

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта (МИИТ)»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Кибовский Владимир Титанович

**РАСЧЕТНЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ**

05.26.01 – Охрана труда (транспорт)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Рахманов Борис Николаевич

Москва - 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ И ЗАРУБЕЖНАЯ СИСТЕМЫ ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ. ПРОБЛЕМА ПРОТИВОРЕЧИЙ	15
1.1 Медико-биологические основы гигиенического нормирования лазерного излучения. Обзор литературы	15
1.1.1 Общие механизмы биологического действия лазерного излучения	15
1.1.2 Влияние лазерного излучения на орган зрения	17
1.1.3 Влияние малоинтенсивного ЛИ на состояние здоровья рабочего персонала	20
1.2 Гигиеническое нормирование лазерного излучения и несоответствия отечественных и зарубежных норм лазерной безопасности	21
1.2.1 Общие принципы гигиенического нормирования лазерного излучения	21
1.2.2 Нормы лазерной безопасности МЭК	22
1.2.3 Отечественные нормы лазерной безопасности	24
1.3 Классификация лазерных изделий по степени опасности лазерного излучения и несоответствия отечественной и зарубежной СКЛ	29
1.3.1 Классификация ЛИЗ по стандарту IEC 60825 – 1:2007	29
1.3.2 Классификация ЛИЗ по ГОСТ 12.1.040 и СН 5804	32
1.3.3 Несоответствия СКЛ ЛИЗ по СН 5804 и по ГОСТ 31581	36
1.4 Результаты и выводы по материалам главы 1.....	39
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДОЗИМЕТРИИ В ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ПИЛОТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ	41
2.1 Общая постановка задачи количественной оценки степени опасности лазерного излучения и специальной оценки условий труда при воздействии ЛИ	41
2.2 Расчет энергетической экспозиции в лазерном гауссовом пучке основной TEM_{00} моды	46
2.3 Расчет энергетической экспозиции сетчатки глаза при облучении зрачка лазерным гауссовым пучком основной TEM_{00} моды	50
2.4 Вычисление КСОЛ для глаз в поле лазерного пучка	58
2.5 Упрощенные методики вычисления КСОЛ и расстояний до границ лазерно опасных зон для лазерных пучков	59
2.5.1 Расчет диаметра пучка лазерного излучения	59

2.5.2 Оценка СОЛ для лазерного пучка в ближней зоне	60
2.5.3 Оценка СОЛ для лазерного пучка в средней зоне	62
2.5.4 Оценка СОЛ для лазерного пучка в дальней зоне	63
2.6 Примеры предварительной специальной оценки условий труда водителей транспортных средств и пилотов воздушных судов при воздействии лазерных пучков ...	65
2.6.1 ПСОУТ судоводителей, пилотов ВС и водителей наземных ТС при эксплуатации лазерных навигационных и измерительных систем	65
2.6.2 ПСОУТ пилотов ВС и водителей наземных ТС при воздействии излучения лазерных указок и других ЛИЗ гражданского назначения	68
2.7 Результаты и выводы по материалам главы 2	72
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОСЛЕПЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЛАЗЕРНОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ	74
3.1 Расчетная методика оценки степени ослепления лазерным пучком	74
3.2 Методы определения размеров зон лазерной угрозы безопасности эксплуатации воздушных судов	81
3.2.1 Общая постановка задачи определения пространственных областей и зон лазерной угрозы безопасности эксплуатации ВС	81
3.2.2 Учет конструкции и размеров кабины пилота при определении ПЗЛО ВС ...	84
3.2.3 Учет угла поля зрения пилота при определении ПЗЛО ВС	88
3.2.4 Выводы и предложения по результатам расчетов ПЗЛО ВС	89
3.2.5 Примеры оценки степени реальной лазерной угрозы безопасности полетов ВС.....	91
3.3 Результаты и выводы по материалам главы 3	95
ГЛАВА 4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ДОЗИМЕТРИИ	96
4.1 Теоретические основы разработки лазерных дозиметров	96
4.1.1 Общие требования к дозиметрам лазерного излучения	96
4.1.2 Обеспечение возможности работы лазерного дозиметра в широких диапазонах длительностей и частот повторения импульсов	99
4.1.3 Обеспечение широкого динамического диапазона лазерного дозиметра при использовании фотодиода в качестве приемника излучения.....	105
4.2 Дозиметры лазерного излучения, методы и средства их поверки	111
4.2.1 Лазерные дозиметры ИЛД-2, ИЛД-2М	112
4.2.2 Многоцелевые лазерные дозиметры ЛДМ-1, ЛДМ-2	116
4.2.3 Многоцелевой лазерный дозиметр ЛАДИН	122
4.2.4 Методы и средства поверки лазерных дозиметров.....	125

4.3 Методы дозиметрического контроля лазерного излучения на рабочих местах персонала, обслуживающего лазерные установки.....	130
4.3.1 Методы определения границ рабочей зоны оператора лазерной установки и зоны возможного повреждения глаз	130
4.3.2 Порядок выбора точек дозиметрического контроля	132
4.4 Результаты и выводы по материалам главы 4	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	144
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Применение лазерных технологий повышенного риска в транспортной отрасли. Аспекты безопасности и охраны труда	155
А.1 Лазерные технологические установки, применяемые в транспортном машиностроении	155
А.1.1 Судостроение	155
А.1.2 Автомобилестроение	157
А.1.3 Локомотивостроение и вагоностроение	158
А.2 Навигационная лазерная система «Анемон-3»	159
А.3 Лазерная курсо-глиссадная система посадки воздушных судов	163
А.4 Лазерные измерители скорости и дальности для контроля безопасности дорожного движения	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Лазерная продукция гражданского назначения способная создать угрозу безопасности эксплуатации транспортных средств. Аспекты безопасности при эксплуатации на открытых пространствах	174
Б.1 Лазерные указки «Green laser pointer»	174
Б.2 Лазерные прицелы «ЛЦУ-ОМ-1L», «EL 888077», «Yukon Sight Mark»	176
Б.3 Лазерные дальномеры-рулетки «Leica Disto A5», «Stabila LE 20», «Agatec DM100»	178
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Нормативные документы МЭК по лазерной безопасности	181
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Таблицы для определения ПДУ и классов лазерных изделий по СН 5804 – 91	184
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Таблицы для определения классов ЛИЗ по ГОСТ 31581	186
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Значения коэффициентов степени опасности и расстояний до границ ближних и средних зон а также до границ лазерно опасных зон	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Функции, описывающие формы импульсов и погрешность интегрирования.....	190

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Дозиметры лазерного излучения	194
3.1 Измерители для лазерной дозиметрии ИЛД-2, ИЛД-2М	194
3.2 Многоцелевые лазерные дозиметры ЛДМ-1, ЛДМ-2	196
3.3 Многоцелевой лазерный дозиметр ЛАДИН	198
3.4 Лазерные дозиметры ЛД-4, ЛД-4Э	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия лазеры широко используются в различных сферах деятельности человека. В России поставлена задача всестороннего развития и совершенствования лазерной техники как важнейшей составляющей современной фотоники. В 2013 г. распоряжением Правительства РФ принят план мероприятий («дорожная карта») для обеспечения приоритетного развития технологий фотоники в России, рассчитанный на многие годы [1]. В связи с планируемым значительным ростом объемов производства лазерной продукции и расширением сфер ее применения следует ожидать существенного расширения контингента лиц, контактирующих с лазерным излучением (ЛИ), которое официально отнесено к группе опасных и вредных физических факторов воздействия. Любые лазерные изделия (ЛИЗ) представляют собой продукцию повышенной опасности, связанной, прежде всего, со способностью лазерного излучения, генерируемого в спектральном диапазоне от 380 до 1400 нм, нанести непоправимый ущерб зрительному аппарату человека. Оптические среды глаза (роговица, хрусталик, стекловидное тело) в этой области спектра прозрачны для ЛИ, которое достигает сетчатки глаза и фокусируется на ней в пятно с крайне малым диаметром около 10 мкм, в котором наблюдается чрезвычайно высокая плотность энергии (мощности) ЛИ, превышающая более чем в 10^5 раз ее значение на роговой оболочке глаза.

В последние годы наметились сферы применения лазерной техники, в которых существует повышенный риск неблагоприятного воздействия ЛИ на организм человека. В современном производстве широко используются лазерные технологические установки (ЛТУ), предназначенные для мощного лучевого воздействия на различные материалы с целью их резки, сварки, обработки поверхности [2 – 5], в том числе в машиностроительных отраслях, связанных с транспортом: судостроение, автомобилестроение, локомотивостроение и вагоностроение [6 – 8] (см. раздел (р.) А.1 Приложения А). Из-за достаточно больших габаритов объектов воздействия (например, металлические листы обшивки морских судов) далеко не всегда удается оградить зону воздействия ЛИ на материалы с помощью защитных экранов и кабин. Лазерное излучение отраженное от поверхности объекта воздействия, распространяется в окружающем пространстве и представляет опасность для персонала. В связи с наблюдающимся в последние годы постоянным возрастанием мощности излучения ЛТУ все более актуальным становится инструментальный контроль уровней отраженного ЛИ на рабочих местах (РМ) операторов ЛТУ открытого типа.

В последние двадцать лет лазеры вышли за пределы промышленных предприятий и научных учреждений и применяются на открытых пространствах (ОПР), характеризующихся длинами трасс распространения лазерных пучков от нескольких десятков метров до десятков километров. Широко применяются различные лазерные дальномеры [9], лазерные теодолиты и нивелиры [10]. Внедряются лазерные системы мониторинга окружающей среды [11]. ЛИЗ, работающие на ОПР, применяются в транспортной отрасли. Разработаны лазерные системы навигации, обеспечивающие безопасность проводки судов [12] (см. р. А.2 Приложения А) и посадки воздушных судов [13] (см. р. А.3). Органы контроля безопасности дорожного движения применяют лазерные измерители скорости (ЛИС) автомобилей [14] (см. р. А.4).

В последние годы в свободной продаже появились различные ЛИЗ гражданского назначения, работающие на ОПР: мощные лазерные указки (ЛУК), лазерные прицелы-целеуказатели (ЛПР) для спортивного и охотничьего оружия, лазерные дальномеры-рулетки (ЛДР) (см. Приложение Б). ЛИЗ широко используются в театрально-зрелищных мероприятиях и массовых лазерных шоу, в которых лазерные пучки направляются в небо [15]. Особое опасение вызывает бесконтрольное распространение ЛУК, мощность излучения которых за несколько лет возросла более чем в 10 тысяч раз – от милливатт до десятков ватт! Через интернет можно приобрести ЛУК с мощностью 30 Вт, которые, по сути, являются не «указками», а мощными портативными твердотельными лазерами, способными поджечь картон и пластмассу на расстояниях в десятки метров. Отсутствие государственного контроля продаж мощных ЛИЗ гражданского назначения приводит к наблюдающимся уже несколько лет фактам т.н. «лазерного хулиганства», при котором лазерным пучком ослепляются пилоты воздушных судов (ВС) и водители наземных транспортных средств (водители автотранспорта, члены локомотивных бригад).

В настоящее время указанное противоправное действие может рассматриваться как уголовно наказуемое преступление, предусмотренное введенной 15.04.2017 г. в Уголовный кодекс РФ статьей 267.1 «Действия, угрожающие безопасной эксплуатации транспортных средств». Для выявления наличия состава преступления, предусмотренного ст. 267.1 УК РФ, актуальной становится разработка методов экспертной оценки степени реальной угрозы безопасной эксплуатации транспортных средств (ТС) при несанкционированном воздействии на них излучением лазерных изделий.

Во всех случаях применения лазерных устройств на ОПР существует риск несанкционированного воздействия ЛИ на человека, оказавшегося в поле действия лазерного пучка (например, на пилота ВС или водителя наземного ТС). Актуальной становится задача контроля безопасности ЛИЗ, работающих на ОПР, причем наиболее

эффективным средством контроля является определение с помощью расчетных методик расстояний до границ лазерно опасных зон (ЛОЗ) и наибольших значений коэффициентов степени опасности ЛИ (КСОЛ) на РМ водителя ТС (пилота ВС).

Безопасность применения лазерной продукции регулируется в России с помощью базовых нормативных документов (НД): ГОСТ 12.1.040 – 83 «ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения» [16], «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» № 5804 – 91 [17] (далее СН 5804, СН). С 01.01.2017 г. введены в действие СанПин 2.2.4.3359 – 16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» (далее СанПин) [18]. В разделе «VIII. Лазерное излучение на рабочих местах» установлены гигиенические нормативы ЛИ (предельно допустимые уровни, ПДУ) идентичные ПДУ по СН 5804.

За рубежом действует серия стандартов и других НД Международной Электротехнической Комиссии (МЭК, IEC) с обозначением IEC 60825, возглавляемая стандартом IEC 60825-1:2014 «Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements» (далее IEC-1). Основным инструментом регулирования безопасности применения ЛИЗ в IEC-1 является их классификация по степени потенциальной опасности генерируемого ЛИ, основанная на учете максимально возможных значений энергии (мощности) ЛИ на выходе ЛИЗ. Многолетняя практика применения нормативных документов по лазерной безопасности (ЛБ) показала, что классификация ЛИЗ по степени опасности не является достаточно эффективным средством оценки безопасности людей, попадающих в зону действия ЛИ. Классификация ЛИЗ дает лишь приблизительную качественную оценку степени опасности ЛИ. Она отвечает лишь на вопрос: каким является ЛИ на выходе ЛИЗ (безопасным, умеренно опасным, или очень опасным), но не отвечает на основной вопрос: насколько в количественном выражении опасно ЛИ в заданных точках пространства (в том числе на РМ). Ответ на этот вопрос может дать лишь количественная оценка степени опасности лазерного излучения (СОЛ), проводимая методами лазерной дозиметрии, под которой понимают комплекс расчетных и инструментальных методов и средств определения параметров ЛИ в заданной точке пространства и их сравнения с ПДУ. Становится актуальной разработка и внедрение в практику методов расчетного и инструментального контроля безопасности ЛИ в дополнение к существующей методике классификации ЛИЗ. Эта разработка становится еще более актуальной в связи с тем, что на территории РФ была введена серия национальных стандартов по ЛБ идентичных НД серии IEC 60825, возглавляемая межгосударственным стандартом ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 [19] (далее ГОСТ IEC-1) идентичным стандарту IEC-1. ГОСТ IEC-1 регламентирует классы ЛИЗ

по степени опасности и значительно занижает степень их опасности по сравнению с оценками, получаемыми на основе применения СН 5804.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время степень разработанности указанных актуальных проблем представляется явно недостаточной. В частности отсутствуют публикации по достаточно полному критическому анализу противоречий между отечественными и зарубежными нормами лазерной безопасности. Следует отметить недавнюю публикацию Г. И. Желтова, частично рассматривающую эту проблему [20]. Однако эта публикация последовала после того, как проблема несоответствия норм была рассмотрена автором первоначально в ряде работ, опубликованных в соавторстве с Б. Н. Рахмановым [21 – 23].

Существует математический аппарат классической теоретической фотометрии [24, 25], который позволяет рассчитывать характеристики светового поля обычных некогерентных источников излучения. Однако формулы расчета освещенности площадки, находящейся в световом поле источника, имеющего достаточно широкую диаграмму направленности излучения, не могут быть применены для определения энергетической экспозиции (облученности) в полях узконаправленных гауссовых лазерных пучков.

В работах Рахманова Б. Н. [26, 27] рассматривались методы расчета энергетических характеристик в полях диффузно отраженного лазерного излучения с целью оценки его безопасности. Однако в этих работах не затрагивались вопросы оценки безопасности лазерных пучков и вопросы учета специфики взаимодействия прямого лазерного излучения с оптической системой глаза.

Существует широкая номенклатура средств измерения энергетических параметров лазерного излучения [28]. Однако традиционные радиометры не могут в полной мере удовлетворять требованиям системы ЛБ в части необходимости проведения измерений в широком динамическом диапазоне измеряемых параметров при широком диапазоне длительностей воздействия ЛИ (от единиц наносекунд до нескольких часов) и способности регистрации энергетической экспозиции в каждом импульсе из последовательности при частотах повторения импульсов до нескольких сотен импульсов в секунду.

Цели и задачи работы

Целью работы является обеспечение безопасности людей, связанных с транспортной отраслью, путем специальной оценки условий труда (СОУТ) в условиях воздействия лазерного излучения, основанной на результатах расчетных или инструментальных оценок СОЛ и оценок степени ослепления лазерным пучком (СОСЛ ЛП). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ современного состояния нормативной базы отечественной и зарубежной систем лазерной безопасности с целью выявления имеющихся противоречий и выбора путей их разрешения.

2. Разработать общую методику СОУТ, предусматривающую установление классов (подклассов) условий труда по степени вредности и опасности при воздействии ЛИ на основе результатов количественных оценок СОЛ.

3. Разработать расчетные методы оценки СОЛ и СОСЛ ЛП в полях лазерных пучков.

4. Разработать средства инструментального контроля безопасности ЛИ (лазерные дозиметры), методы их поверки и единую методику дозиметрического контроля ЛИ на рабочих местах с помощью лазерных дозиметров.

Научная новизна работы

1. Впервые установлено, что значения ПДУ по стандарту МЭК существенно превышают ПДУ по СН (в 10 раз в наиболее опасном для глаз спектральном интервале 380 – 600 нм). Применение ПДУ по стандарту МЭК значительно понижает уровень безопасности ЛИЗ. Предложены способы разрешения противоречий: во-первых, путем безусловного сохранения действия ПДУ по СН 5804 на территории РФ (что реализовано в результате введения в действие СанПин 2.2.4.3359); во-вторых, путем разработки нового национального стандарта «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий», гармонизированного с СН и СанПин.

2. Впервые предложена обобщенная методика СОУТ на РМ при воздействии ЛИ на основе применения результатов вычислений или измерений максимальных значений КСОЛ на РМ с использованием ПДУ по СН 5804 и применения классификации условий труда при воздействии ЛИ в соответствии с Приложением 18 к «Методике проведения специальной оценки условий труда», утв. Приказом Минтруда России от 24.01.2014 г. № 33н [29] (далее «Методика СОУТ»).

3. Разработаны расчетные методы оценки СОЛ в полях лазерных пучков, учитывающие специфику взаимодействия ЛИ с оптической системой глаза. Выведена формула для вычисления максимального значения энергетической экспозиции сетчатки глаза при его облучении гауссовым пучком основной ТЕМ₀₀ моды и формула определения диаметра минимально возможного пятна облучения на сетчатке (10 мкм) при наихудшей аккомодации глаза на плоскость, расположенную вблизи перетяжки пучка. Разработана упрощенная методика вычисления КСОЛ и расстояний до границ ЛОЗ. Проведена предварительная (расчетная) СОУТ (ПСОУТ) судоводителей, водителей наземных ТС и пилотов ВС при воздействии пучков ЛИ, генерируемых ЛИЗ, работающими на ОНР: лазерные маяки навигационных систем «Анемон-3» и «Глиссада-М»; ЛИС марок «ЛИСД-

2Ф» и «ЛУЧ-М»; ЛУК «Green laser pointer»; ЛПП: «ЛЦУ-ОМ-1L», «EL 888077», «Yukon Sight Mark»; ЛДР: «Leica Disto A5», «Stabila LE 20», «Agatec DM100».

4. Впервые разработаны методы СОСЛ ЛП, основанные на гигиеническом нормативе – предельно допустимый уровень ослепления лазерным излучением (ПДУ ОСЛ). Применен ПДУ ОСЛ, вычисленный по зарубежным данным о расстояниях до границ зон ослепления пилотов ВС лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Предложена методика определения границ зон лазерной угрозы эксплуатации воздушных судов, совершающих взлет и посадку.

5. Разработаны схемотехнические решения средств инструментального контроля безопасности ЛИ (лазерных дозиметров), реализующие метод интегрирования с автосинхронизацией (МИА) и обеспечивающие возможность проведения измерений в широком динамическом диапазоне измеряемых энергетических параметров при широких диапазонах длительностей и частот повторения импульсов ЛИ. Схемотехнические решения выполнены на уровне изобретений, защищенных авторскими свидетельствами: «Устройство для измерения энергетических параметров световых импульсов» (авт. св. №533832) [30], «Лазерный дозиметр» (авт. св. №1141846) [31]), «Многоцелевой лазерный дозиметр» (авт. св. №1571813) [32] и патентом «Устройство оперативного дозиметрического контроля лазерного излучения опасного для глаз человека» (SU 1817836 A) [33]. Разработаны методы поверки лазерных дозиметров и соответствующая поверочная установка, обеспечившие единство измерений в области лазерной дозиметрии.

6. Впервые разработаны единые методики дозиметрического контроля ЛИ на РМ, обеспечивающие достоверность и воспроизводимость результатов измерений. Методики регламентированы в ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 «Система стандартов безопасности труда. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения» [34].

Теоретическая и практическая значимость работы

Методики оценки СОЛ позволяют проводить СОУТ людей, связанных с транспортной отраслью (в том числе водителей ТС и пилотов ВС), с целью разработки мер обеспечения их безопасности. Методики оценки СОСЛ ЛП позволяют установить параметры зон потенциальной лазерной угрозы для ВС, осуществляющих взлет или посадку, и провести организационно-технические мероприятия по контролю и ограничению использования в этих зонах ЛИЗ, угрожающих безопасности полетов. Результаты расчетной СОУТ могут быть использованы для выявления наличия состава преступления, предусмотренного ст. 267.1 УК РФ.

На основе схемотехнических решений, реализующих МИА, разработаны и внедрены в серийное производство лазерные дозиметры: ИЛД-2М, ЛДМ-2, ЛАДИН. Лазерные

дозиметры (ЛД) указанных марок сертифицированы и внесены в Государственный реестр средств измерений под номерами: 7845-80, 11216-88, 16028-03. Лазерные дозиметры указанных типов широко используются организациями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) для инструментального контроля условий труда на различных предприятиях, использующих лазерные технологии.

Создана универсальная поверочная установка для поверки лазерных дозиметров. Методы поверки регламентированы в нормативных документах: РД 50-529 – 85 «Методические указания. Измеритель для лазерной дозиметрии ИЛД-2. Методы и средства поверки» [35], Р 50.2.025 – 2002 «Рекомендации по метрологии. Государственная система обеспечения единства измерений. Дозиметры лазерные. Методика поверки» [36].

Методология и методы исследования

В работе используются методы расчета энергетических и пространственных параметров лазерных пучков [37] с целью СОУТ, также методы расчета параметров электронных цепей с применением операционного исчисления [38] для разработки схемотехнических решений средств инструментального контроля лазерной безопасности.

Положения, выносимые на защиту

1. Значения ПДУ по стандарту МЭК (ГОСТ ИЕС-1) существенно превышают ПДУ по СН (в 10 раз в наиболее опасном для глаз спектральном интервале 380 – 600 нм); применение ПДУ по стандарту МЭК (ГОСТ ИЕС-1) значительно понижает уровень безопасности ЛИЗ. Для устранения противоречий предлагаются и обосновываются следующие мероприятия: а) безусловное сохранение действующих ПДУ по СН 5804 в новых санитарно-гигиенических нормативных документах по ЛБ (предложение реализовано в СанПин 2.2.4.3359); б) разработка нового национального стандарта по ЛБ, гармонизированного с СН 5804 в части ПДУ.

2. Методика специальной оценки условий труда людей, связанных с транспортной отраслью, в условиях воздействия ЛИ. СОУТ осуществляется путем применения результатов вычислений и (или) измерений максимальных значений коэффициентов степени опасности ЛИ на РМ с использованием ПДУ по СН (СанПин 2.2.4.3359) и классов (подклассов) условий труда по Приложению 18 к «Методике СОУТ» с помощью таблицы «Максимальные значения КСОЛ в зависимости от классов (подклассов) вредности и опасности условий труда при воздействии лазерного излучения».

3. Формула для определения минимально возможного диаметра пятна на сетчатке (10 мкм) при наихудшей аккомодации глаза и формула для определения максимальных значений экспозиции сетчатки, соответствующих минимальному диаметру пятна облучения

на сетчатке. Использование этих формул позволяет учесть наиболее опасные условия острой фокусировки в лазерном пучке при разработке гигиенических нормативов лазерного излучения.

4. Упрощенные формулы вычисления КСОЛ и расстояний до границ лазерно опасных зон для лазерных пучков. Результаты предварительной специальной оценки условий труда судоводителей, пилотов ВС и водителей наземных ТС с использованием указанных формул при работе навигационных систем «Анемон-3» и «Глиссада-М» а также ЛИС марок «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М»; ЛУК «Green laser pointer»; ЛПП: «ЛЦУ-ОМ-1L», «EL 888077», «Yukon Sight Mark»; ЛДР: «Leica Disto A5», «Stabila LE 20», «Agatec DM100» позволяют оценить в ряде случаев условия труда как вредные подклассов 3.2 – 3.4 и опасные класса 4 (для водителей наземных ТС при воздействии излучения ЛУК «Green laser pointer» мощностью 100 и 200 мВт).

5. Расчетная методика оценки СОСЛ ЛП и методика определения расстояний до границ зон лазерной угрозы эксплуатации ВС, совершающих посадку. Результаты вычислений: расстояния до границ равны 8 км вдоль оси взлетно-посадочной полосы (ВПП) и 1 км влево и вправо от ВПП; минимальная высота полета, при которой возникает лазерная угроза, равна 500 м.

6. Схемотехнические решения лазерных дозиметров: ИЛД-2М, ЛДМ-2, ЛАДИН, основанные на применении метода интегрирования с автосинхронизацией. Схемы ЛД позволяют проводить контроль безопасности ЛИ в широком диапазоне значений энергетических параметров непрерывного и импульсного излучения при широком диапазоне длительностей воздействия и больших частотах повторения импульсов.

7. Методики проведения дозиметрического контроля ЛИ на РМ, обеспечивающие единство измерений при проведении СОУТ на рабочих местах.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов контроля безопасности лазерного излучения, полученных в результате применения разработанных методов контроля, соответствует требованиям нормативных документов в области лазерной безопасности.

Результаты работы докладывались на всесоюзных и всероссийских конференциях: «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение» [39, 41, 42, 45]; «Применение лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике» [40]; «Применение лазеров в науке и технике» [43]; «Гигиенические аспекты использования лазерного излучения в народном хозяйстве» [44] а также на 6-ом Всесоюзном семинаре «Импульсная фотометрия» [46].

Личный вклад автора. Диссертация является обобщением проведенных лично автором исследований в области ЛБ, заключающихся в критическом анализе нормативной базы ЛБ, обосновании и разработке методов количественной оценки СОЛ и СОСЛ ЛП, методов СОУТ в условиях воздействия ЛИ, в разработке функциональных схем лазерных дозиметров и организации работ в рамках НИР и ОКР по лазерным дозиметрам и внедрению результатов ОКР в серийное производство.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и восьми приложений. Объем основного текста диссертации составляет 154 машинописных страниц и включает 49 рисунков, 12 таблиц; объем приложений составляет 46 машинописных страниц и включает 26 рисунков, 25 таблиц; список литературы содержит 125 наименований.

**ГЛАВА 1. ОТЕЧЕСТВЕННАЯ И ЗАРУБЕЖНАЯ СИСТЕМЫ ГИГИЕНИЧЕСКОГО
НОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ
ЛАЗЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ.
ПРОБЛЕМА ПРОТИВОРЕЧИЙ**

**1.1 Медико-биологические основы гигиенического нормирования
лазерного излучения. Обзор литературы**

1.1.1 Общие механизмы биологического действия лазерного излучения

С начала 60-х годов в США и СССР проводились работы по исследованию результатов воздействия лазерного излучения на организм животных, разрабатывались математические модели механизмов воздействия лазерного излучения на биологические структуры. Уже первые зарубежные публикации по вопросу биологического действия ЛИ (БД ЛИ) [47 – 51], появившиеся после открытия лазера, показали, что ЛИ является крайне опасным гомогенным фактором окружающей человека среды обитания. Это потребовало в дальнейшем проведения исследований с целью гигиенического нормирования ЛИ и разработки методов и средств защиты от его неблагоприятного воздействия. Результаты этих работ составили основу современных систем лазерной безопасности.

В 1966 году была опубликована брошюра Б. В. Леонова и В. В. Шиходырова «Лазеры и клетка», в которой впервые в нашей стране рассматривались механизмы действия ЛИ на биологические структуры [52]. В 1968 году была опубликована книга «Биологическое действие излучения лазера» (Файн С., Клейн Э.) [53], в которой были обобщены результаты медико-биологических исследований, проведенных в США в 1961 – 1965 гг. В последующие годы был опубликован целый ряд работ, рассматривающих различные аспекты ЛБ, в том числе и вопросы БД ЛИ [54 – 65]. Современный взгляд на проблему БД ЛИ изложен в работе [64].

Действие лазерного излучения на организм человека зависит от параметров ЛИ: длины волны λ (нм), энергии W (Дж), мощности P (Вт) ЛИ, длительности воздействия t_B (с), частоты следования импульсов $F_{\text{и}}$ (Гц, $\text{имп}\cdot\text{с}^{-1}$), размеров облучаемой области и анатомо-физиологических особенностей облучаемой ткани (глаз, кожа и пр.). При малых интенсивностях взаимодействие ЛИ с тканями (отражение, поглощение) не отличается от взаимодействия излучения других монохроматических некогерентных источников оптического излучения. С ростом интенсивности излучения процесс взаимодействия

усложняется. Высокие энергетические плотности ЛИ, характеризуемые энергетической экспозицией H (Дж·м⁻²) и облученностью E (Вт·м⁻²) поверхностей тканей, ведут к их структурным изменениям и изменениям их оптических свойств непосредственно во время действия излучения. Ввиду того, что ткани имеют различные спектральные характеристики поглощения, ЛИ действует избирательно на различные органы и системы и даже на различные внутриклеточные структуры. Однако монохроматичность ЛИ не является существенным отличительным фактором, влияющим на степень его биологического действия. Высокая монохроматичность ЛИ вызвала бы заметные специфические эффекты в живой ткани только при наличии узких полос поглощения. Таких полос поглощения у сложных молекул не обнаружено [64].

Тепловой эффект – важнейший процесс взаимодействия ЛИ с биологическими тканями. Спецификой теплового действия ЛИ, в отличие от контактного термического ожога, является то, что в структурах тканей могут нагреваться до высоких температур лишь некоторые слои, а при воздействии коротких импульсов – лишь некоторые элементы клеток, в то время как среднее по всей клетке приращение температуры мало. Для лазерного ожога, вызванного импульсом, характерно наличие резких границ пораженного участка. Это объясняется тем, что за короткое время действия импульса тепло не успевает распространиться за пределы облучаемого участка. Критерий теплового поражения можно использовать при условии длительности ЛИ более 10^{-5} с.

За такой промежуток времени выделившееся тепло успевает перераспределиться в ткани. При коротких импульсах (например, при действии лазера с модулированной

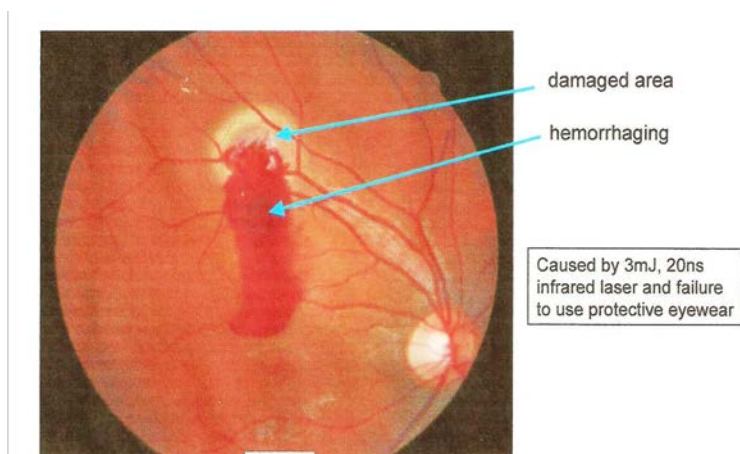


Рисунок 1.1 – Результат воздействия наносекундного импульсного ЛИ на сетчатку глаза [66]. В пояснительной надписи указано: «failure to use protective eyewear» (не выполнено требование применять средство защиты глаз)

добротностью) среднее повышение температуры невелико. Например, при действии на сетчатку глаза импульса ЛИ с плотностью энергии $0,07$ Дж·см⁻² и длительностью $3 \cdot 10^{-8}$ с (30 нс) уже наблюдается ее поражение, хотя повышение температуры сетчатки составляет всего 5°C , т.е. при действии на сетчатку излучения лазера с модулированной добротностью тепловая модель поражения неприменима [64].

На рисунке 1.1 показана фотография сетчатки глаза, подвергшегося случайному воздействию импульсного ЛИ с длиной волны, лежащей в ближней ИК области спектра, с энергией импульса 3 мДж и длительностью 20 нс [66]. На рисунке 1.1 видны область поражения (damaged area) и зона кровоизлияния (hemorrhaging).

При действии ЛИ на сетчатку оно поглощается гранулами меланина, имеющими размеры порядка 1 мкм. Температура гранул меланина может повышаться до больших значений, в том числе и превышающих 100°C. Повышение этого уровня приводит к парообразованию на поверхности гранул, появлению ударных волн, резкому повышению давления внутри клетки и к ее механическому разрушению. Возникает процесс физического усиления действия поглощенного тепла в связи с изменением агрегатного состояния тканевой воды. Тепловая модель поражения сетчатки полностью соответствует наблюдаемой картине при уровнях облученности (экспозиции) близких к пороговым.

1.1.2 Влияние лазерного излучения на орган зрения

При работе с ЛИЗ непосредственному воздействию ЛИ могут подвергаться как глаза, так и открытые кожные покровы пользователей и посторонних людей. В дальнейшем в этой работе мы будем рассматривать лишь вопросы влияния лазерного излучения на глаз человека, поскольку специфические особенности органа зрения определяют особую, крайне высокую чувствительность глаз к действию ЛИ. Локализация и степень выраженности патологических изменений в различных структурах глаза при их поражении лазерным пучком в значительной мере зависят от длины волны, мощности, энергии ЛИ, от режима генерации (импульсный или непрерывный), а также от степени фокусировки лазерного пучка органом зрения. Известно, что до 80% энергии ЛИ в видимом диапазоне и около 40% энергии ближнего ИК ЛИ проходит через элементы оптической системы (ОС) глаза (роговицу, переднюю камеру, хрусталик, стекловидное тело), показанные на рисунке 1.2 [67], не поглощаясь (рисунок 1.3а [68]), в отличие от ЛИ, генерируемого в средней и дальней ИК и УФ областях спектра (рисунок 1.3б [68]).

ЛИ, генерируемое в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм, достигает глазного дна, при этом *за счет фокусировки значение плотности мощности (энергии) ЛИ, попадающего на сетчатку, значительно возрастает* (рисунок 1.4 [68]).

Из рисунков 1.5 [64], 1.6 [54], на которых представлены кривые поглощения (рисунок 1.5) и пропускания (рисунок 1.6) светового излучения различных длин волн в ОС глаза, видно, что в диапазоне λ от 400 до 1200 нм излучение поглощается в минимальной

степени (т.е. пропускается в максимальной степени), и, следовательно, вероятность повреждения ОС невелика.

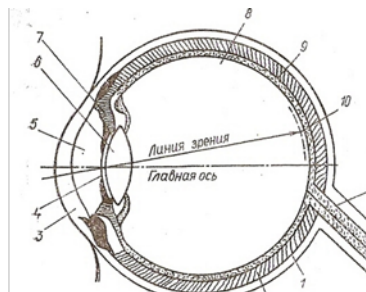


Рисунок 1.2 – Схема строения глаза [67]: 1 – склера; 2 – сосудистая оболочка; 3 – роговица; 4 – зрачок; 5 – передняя камера глаза; 6 – хрусталик; 7 – радужка; 8 – стекловидное тело; 9 – сетчатая оболочка (сетчатка); 10 – желтое пятно; 11 – зрительный нерв

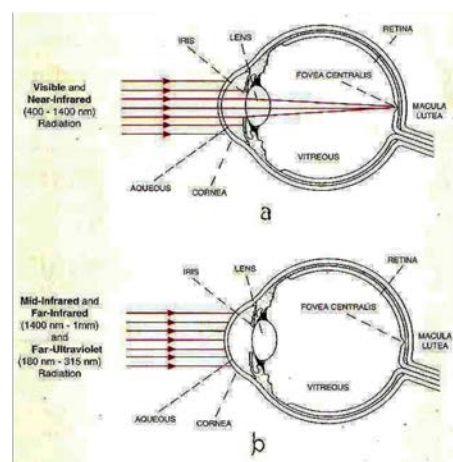
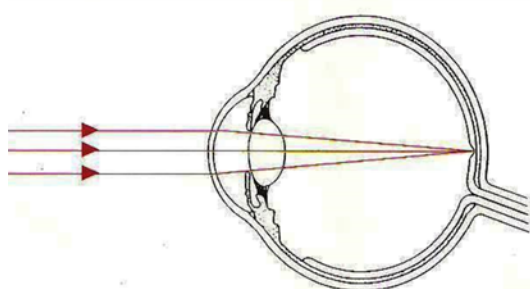


Рисунок 1.3 – Воздействие параллельного лазерного пучка на глаз человека [68]: а – ЛИ в видимой и ближней ИК области спектра (400 – 1400 нм); б – ЛИ в средней и дальней ИК (1400 – 10⁶ нм), а также в дальней УФ (180 – 315 нм) областях спектра: cornea – роговица, aqueous – глазная жидкость, iris – радужная оболочка, lens – хрусталик, retina – сетчатка, fovea centralis – центральная ямка, vitreous – стекловидное тело)



FOR WAVELENGTHS THAT FOCUS ON THE RETINA (400 TO 1400 nm)
THE OPTICAL GAIN OF THE EYE IS ABOUT 100,000 TIMES
IF THE IRRADIANCE ENTERING THE EYE IS 1 mW /cm²,
THEN THE IRRADIANCE AT THE RETINA WILL BE 100 W /cm².

Рисунок 1.4 – Фокусировка параллельного лазерного пучка на сетчатку глаза [68]. Надписи: «Для излучения с длинами волн от 400 до 1400 нм, которое фокусируется на сетчатку, коэффициент оптического усиления (по плотности мощности или энергии, авт.) примерно 100 000 раз»; «Если облученность на входе в зрачок глаза равна 1 мВт/см², то облученность сетчатки будет 100 Вт/см²»

Однако она резко возрастает при воздействии излучений с λ короче 400 нм и длиннее 1400 нм, т.е. в УФ, а также в средней и дальней ИК частях спектра, для которых ОС являются непрозрачными. Для тканей глазного дна эти излучения не представляют существенной опасности, так как они их не достигают (рисунок 1.3b). Из рисунка 1.6 (кривая 2) следует, что

наибольшую опасность для сетчатки представляют «зеленое» излучение аргонового газового лазера ($\lambda = 473, 488, 515, 529$ нм), «зеленое» излучение второй гармоники ($\lambda = 532$ нм) твердотельного лазера на алюмоиттриевом гранате с неодимом (Nd:YAG; $\lambda = 1064$ нм), применяемого в современных лазерных указках, а также «синее» излучение современных полупроводниковых лазеров ($\lambda = 445$ нм), также широко применяемых в ЛУК.

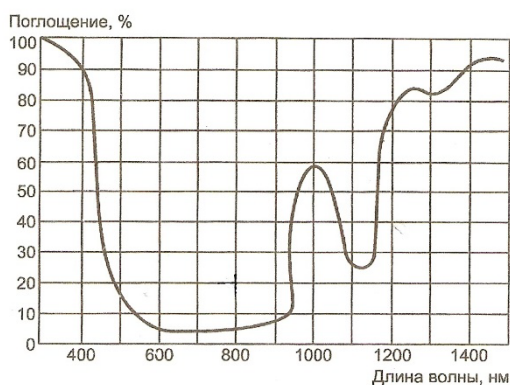


Рисунок 1.5 – Кривая поглощения светового излучения в ОС глаза [64]

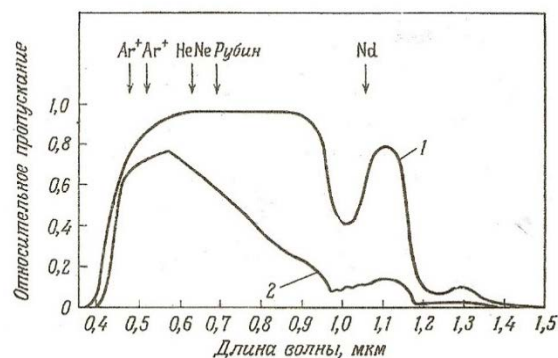


Рисунок 1.6 – Кривые пропускания светового излучения средами глаза [54]: 1 – кривая пропускания ОС глаза; 2 – совокупная кривая пропускания с учетом поглощения в сетчатке

В случае воздействия на глаз излучения высокоомощных импульсных лазеров обширная патология может обнаружиться во всех областях глаза, вплоть до его полного разрушения. Попадание в орган зрения лазерного пучка достаточной интенсивности с длиной волны в видимой или ближней ИК области спектра сопровождается внезапным выпадением части поля зрения без каких-либо болевых ощущений [64]. Пострадавшие отмечают лишь ощущение толчка, удара в глаз. На глазном дне обнаруживается ожог и отек сетчатки, кровоизлияния в сетчатку и стекловидное тело (рисунок 1.1). Лазерное излучение в УФ и дальней ИК части спектра поглощается в основном поверхностными элементами ОС: роговицей, хрусталиком, стекловидным телом. Поэтому лазеры, работающие в УФ диапазоне, могут вызвать болезненные ожоги роговицы, сходные с ожогами, наблюдающимися при дуговой сварке [58]. Излучение в дальнем ИК диапазоне представляет опасность, прежде всего, для роговицы глаза, в которой могут возникать очаги помутнений из-за денатурации белков. С возрастанием мощности ЛИ и времени экспозиции развиваются более тяжелые поражения с образованием кратеров и обугливанием роговицы.

Различают три основных группы механизмов повреждающего действия ЛИ на орган зрения: фотохимические, термические, фотомеханические.

Фотохимические механизмы в основном определяют действие ЛИ в УФ и видимой области спектра, фотоны которого обладают достаточно высокой энергией для перевода атомов в возбужденное состояние. Высокие плотности излучения приводят к появлению поражающих эффектов. Пусковым моментом при этом являются изменения в пигментном эпителии, т.к. он претерпевает патологические изменения раньше, чем они проявляются в рецепторах. В первую очередь страдает меланин, который является источником свободных радикалов. Меланин имеет максимум абсорбции в области 440 нм, которая играет основную роль в фотохимическом повреждении сетчатки.

Термический механизм повреждения органа зрения лазерным излучением является наиболее универсальным для видимой и ближней ИК областей спектра при длительности воздействия от 1 мс до 10 с. При достаточно высокой плотности мощности ЛИ тепло, выделяющееся в очаге облучения, вызывает коагуляцию белков, что клинически проявляется в виде ожога ткани. Коагуляция наступает при температуре плюс 58°C; при достижении температуры плюс 100°C происходит вскипание содержащейся в ткани воды и парообразование в очаге ожога.

Фотомеханические повреждения возникают, когда в очаге лазерного воздействия достигается температура кипения воды, в результате которого происходит механический разрыв ткани расширяющимся парогазовым пузырьком. Роль механического фактора в механизмах повреждающего действия ЛИ возрастает по мере роста мощности и сокращения длительности воздействия до 1 мс и менее.

1.1.3 Влияние малоинтенсивного ЛИ на состояние здоровья рабочего персонала

Многолетние наблюдения за состоянием здоровья больших групп работников, обслуживающих различные типы лазерных установок, позволяют утверждать, что длительное *хроническое воздействие малоинтенсивного рассеянного ЛИ* оказывает негативное влияние на организм в целом, приводя к возникновению функциональных расстройств не только со стороны органа зрения, но и ряда других органов и систем организма, в первую очередь нервной и сердечно-сосудистой. Характерным оказалось существенное преобладание этих отдаленных вторичных эффектов над локальными первичными, связанными с непосредственным повреждающим действием излучения [64].

К наиболее характерным клиническим синдромам, обнаруживаемым у работающих с лазерами с существенно большей частотой, чем в контрольных группах, относят астенический и астено-вегетативный синдромы, а также вегетативно-сосудистую дисфункцию [56]. Для лиц, работающих с ЛИЗ, типичны жалобы на повышенную утомляемость, общую слабость, ощущение разбитости, вялости, повышенную чувствительность к яркому свету, резким звукам и другим раздражителям, нарушения ритма сна, наличие тупых головных болей и неприятных ощущений в области сердца. Было отмечено различие в количестве лиц с субъективными расстройствами, когда уровни рассеянного ЛИ от неодимовых лазеров ($\lambda = 1064$ нм) на рабочих местах персонала в условиях двух производств различались более чем в 2 раза ($3 \cdot 10^{-5}$ и $7 \cdot 10^{-5}$ Дж·см⁻²). Если на первом производстве ухудшение самочувствия было отмечено лишь у 29% обследованных, то на втором число их было достоверно больше – 77% [64].

1.2 Гигиеническое нормирование лазерного излучения и несоответствия отечественных и зарубежных норм лазерной безопасности

1.2.1 Общие принципы гигиенического нормирования лазерного излучения

Гигиеническое нормирование ЛИ (ГН ЛИ) основано на применении следующих методических принципов:

- проведение экспериментов на животных с использованием лазерных излучателей, работающих в различных режимах генерации: непрерывное лазерное излучение (НЕПР ЛИ), импульсное лазерное излучение (ИМП ЛИ), импульсно-модулированное лазерное излучение (ИМ ЛИ) и генерирующих ЛИ на различных длинах волн;

- статистическая обработка результатов экспериментов, полученных различными исследователями за достаточно большой период проведения исследований по БД ЛИ;

- создание теоретических моделей взаимодействия лазерного излучения с биологическими структурами, учитывающих термические, фотохимические, фотомеханические механизмы воздействия;

- разработка физико-математических моделей переноса на человека результатов исследований по БД ЛИ, полученных на животных, с учетом определенного коэффициента гигиенического запаса;

- установление сравнительно простых формул для вычисления предельно допустимых уровней ЛИ, позволяющих распространить результаты исследований, полученных для отдельных длин волн и для отдельных режимов генерации, на весь оптический спектральный диапазон и на все возможные длительности воздействия ЛИ.

Приведем дополнительные разъяснения к сформулированным выше методическим подходам, применяемым при ГН ЛИ, приведенные в работе одного из основоположников отечественной системы лазерной безопасности Г. И. Желтова [65]. Здесь и далее в цитируемых текстах соискатель (автор) выделяет курсивом свои пояснения, а также выделяет полужирным текстом положения, заслуживающие особого внимания.

«Мерой лучевой стойкости тканей глазного дна к излучению с заданным спектральным составом и длительностью экспозиции принято считать минимальное значение энергии излучения W (Дж) (мощности P (Вт)), вызывающей первичное **необратимое наблюдаемое офтальмоскопически изменение структуры пигментного эпителия с вероятностью 50% через 1 час после облучения**. Эти значения называются **пороговыми** и обозначаются P_{th} (th – от английского threshold – порог). ... В основу

американского стандарта (*стандарт ANSI Z 136.1* [69], *авт.*) положены результаты измерений на животных при воздействии направленного лазерного излучения на глаза ... На основе этих данных определены зависимости от t , λ предельно допустимых уровней (Exposure Limits) облучения человека направленным потоком лазерного излучения $P_{EL}(t, \lambda)$ по формуле $P_{EL} = P_{th} / k$, где k – коэффициент гигиенического запаса (hygienic coefficient), который формировался на основе экспертных оценок с учетом таких факторов, как погрешность измерений, несовершенство экспериментальной методики определения порога фотоповреждения тканей на основе визуальной фиксации, **перенос на человека результатов эксперимента на животных** и др. Полученные зависимости $P_{EL}(t, \lambda)$ для удобства пользователей аппроксимировались простыми функциями таким образом, чтобы коэффициент запаса был равен или больше значения данного экспертной оценкой. Минимальное значение k в действующих американском и европейском стандартах по лазерной безопасности имеет порядок 10». Далее автор работы [64] пишет:

«Механизмы деструктивного действия лазерного излучения активно изучались и были предметом дискуссий на многих представительных международных форумах. ... Указанные работы **использовали упрощенные модели** (что естественно для пионерских исследований), в частности, не учитывались такие факторы, как наличие кровотока в сосудистой оболочке, гранулированность структуры пигментного эпителия и некоторые другие. Теория «работала» в достаточно узком диапазоне параметров задачи».

Отечественными специалистами, занимавшимися вопросами БД ЛИ в 80-е годы, были *применены более современные физико-биологические модели поражения сетчатки глаза человека, и более точные модели переноса результатов эксперимента с животных на человека, свободные от недостатков, имевшихся в подходах западных ученых в 70-е годы прошлого века*. Например, при установлении ПДУ для глаза были учтены наиболее неблагоприятные условия т.н. «острой фокусировки» гауссова пучка, учитывающие эффект аккомодации глаза на плоскость, лежащую вблизи перетяжки падающего пучка (подробнее см. в главе 2). К концу 80-х в СССР были получены результаты по ГН ЛИ, которые *объективно оказались жестче западных нормативов*.

1.2.2 Нормы лазерной безопасности МЭК

В конце 70-х годов прошлого века технический комитет № 76 МЭК (IEC) «Laser equipment» («Лазерное оборудование») приступил к разработке международного стандарта по ЛБ. Работа над стандартом завершилась принятием в 1984 г. стандарта IEC 825:1984 «Radiation safety of laser products, equipments, and user's guide». Основной целью введения

стандарта IEC 825 была регламентация порядка классификации лазерной продукции по степени потенциальной опасности для организма человека. В основу стандарта IEC 825 был положен стандарт США ANSI Z 136.1 – 1973 [69].

В настоящее время действует стандарт IEC 60825-1:2014, возглавляющий серию стандартов и других НД с обозначением IEC 60825 «Safety of laser products» («Безопасность лазерной продукции»). В Приложении В приведена таблица В.1 с перечнем 11-ти нормативных документов серии IEC 60825. В таблице В.1 приведены также наименования введенных сравнительно недавно национальных стандартов РФ эквивалентных НД серии IEC 60825. Серию стандартов РФ эквивалентных НД МЭК по ЛБ возглавляет стандарт ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 [19] (ГОСТ IEC-1) идентичный стандарту IEC 60825-1:2007 (т.е. стандарту IEC 60825-1 в редакции 2007 года).

Рассмотрим более подробно стандарт IEC 60825-1:2007 (далее IEC-1), который был положен в основу ГОСТ IEC-1. В IEC-1 регламентируются предельно допустимые уровни ЛИ, которые в IEC-1 называются «maximum permissible exposure, MPE» (максимально допустимая экспозиция, МДЭ). Для спектрального диапазона от 400 до 1400 нм при $t_B \leq 10$ с нормируется ПДУ (MPE) энергетической экспозиции H_{MPE} (Дж·м⁻²) от лазерного излучения на роговице глаза. При $t_B > 10$ с нормируется ПДУ (MPE) облученности E_{MPE} (Вт·м⁻²) от лазерного излучения на роговице глаза. В IEC-1 указано, что диаметр ограничивающей апертуры при определении H_{MPE} и E_{MPE} в указанном спектральном диапазоне должен быть равен 7 мм (нормированное среднее значение диаметра зрачка в условиях ночного зрения).

В Приложении В приведена таблица В.2, представляющая собой фрагмент таблицы «Table A.1» из стандарта IEC-1, содержащей формулы для вычисления MPE коллимированного ЛИ, воздействующего на роговицу глаза в видимой, ближней, средней и дальней ИК областях спектра (от 400 до 10⁶ нм) при t_B от 10⁻¹³ с до 3·10⁴ с. Основная расчетная формула стандарта IEC-1, распространяющаяся на наиболее опасный для глаз видимый спектральный диапазон 400 – 700 нм, имеет вид

$$H_{MPE} = 18 t^{0,75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (1.1)$$

При вычислении ПДУ (MPE) в видимой области спектра для НЕПР ЛИ или ИМ ЛИ принято *ограничивать время воздействия средней длительностью защитного мигательного рефлекса человека равной 0,25 с*. Принимая в формуле (1.1) $t = t_B = 0,25$ с, получаем $H_{MPE} = 6,37$ Дж·м⁻². Легко вычислить значение предельно допустимой облученности зрачка за время 0,25 с по формуле $E_{MPE} = H_{MPE}/t_B = 25,5$ Вт·м⁻². В свою очередь, можно вычислить ПДУ мощности лазерного излучения, попадающего в зрачок диаметром

7 мм, умножив полученное значение $E_{\text{МРЕ}}$ на площадь зрачка $S_{\text{ЗР}} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Получаем $P_{\text{МРЕ}} = E_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}} = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \approx 1 \text{ мВт}$.

При вычислении ПДУ (МРЕ) для НЕПР ЛИ или ИМ ЛИ, генерируемого в невидимой глазом области спектра 700 – 1050 нм, в которой работают многие лазерные изделия, предназначенные для работы на ОНР, принято *ограничивать время воздействия интервалом $t = t_{\text{в}} = 10 \text{ с}$ равным средней длительности нахождения человека в неподвижном состоянии*. Для вычисления МРЕ в указанном спектральном интервале (СПИ) используют формулу $E_{\text{МРЕ}} = 10 C_4 C_7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$. Для наиболее применяемой длины волны $\lambda = 905 \text{ нм}$ спектральные коэффициенты $C_4 = 10^{0,02 (\lambda - 700)} = 2,82$ и $C_7 = 1$. Тогда получаем $E_{\text{МРЕ}} = 28,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ и $P_{\text{МРЕ}} = E_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 1,1 \text{ мВт}$.

Соискатель провел сравнение расчетных формул, приведенных в «Table A.1» из IEC 60825-1:2007, с формулами для вычисления МРЕ, приведенными в стандарте США ANSI Z 136.1 – 1973 [66], изданном еще в 1973 году, и пришел к следующему выводу.

Ни конкретные значения МРЕ, ни формулы для вычисления МРЕ для спектрального диапазона от 400 до 1400 нм, регламентированные в IEC 60825-1:2007 для длительностей воздействия прямого пучка ЛИ от 10^{-9} до 10 с, практически не отличаются от значений и формул, приведенных в ANSI Z 136.1 – 1973. Другими словами, можно утверждать, что в действующих и сегодня стандартах МЭК регламентированы нормативы ЛБ, установленные в США более сорока лет назад.

1.2.3 Отечественные нормы лазерной безопасности

В 1991 г. в России были приняты научно обоснованные ПДУ, более жесткие чем в ANSI Z 136.1 и IEC 60825-1. Эти ПДУ регламентированы в СН 5804 – 91 [17]. СН были разработаны специалистами целого ряда медицинских НИИ и учреждений, изучавшими вопросы БД ЛИ, а также работниками ряда НИИ и КБ, специализировавшимися в различных областях применения лазерных технологий. Соискатель принимал непосредственное участие в разработке СН 5804 – 91. Значения ПДУ вычисляют по приведенным в СН формулам и графикам. ПДУ зависят от длины волны лазерного излучения λ (нм), длительности воздействия ЛИ $t_{\text{в}}$ (с) и режима генерации ЛИ (НЕПР ЛИ; ИМП ЛИ, ИМ ЛИ). В соответствии с СН [17]:

«Предельно допустимые уровни лазерного излучения при однократном воздействии – уровни излучения, при воздействии которых существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме работающего».

В СН для спектрального диапазона от 380 до 1400 нм при $t_B \leq 1$ с нормируется ПДУ энергии $W_{\text{ПДУ}}$ (Дж) лазерного излучения, прошедшего через нормированную апертуру диаметром 7 мм, что соответствует среднему диаметру зрачка глаза человека в условиях ночного зрения. При $t_B > 1$ с нормируется ПДУ мощности $P_{\text{ПДУ}}$ (Вт) ЛИ, прошедшего через нормированную апертуру диаметром 7 мм.

В приложении Г приведены таблицы Г.1, Г.2, представляющие собой «Таблицы 3.3 и 3.4» из СН, регламентирующие ПДУ коллимированного ЛИ в видимой и ближней ИК области спектра 380 – 1400 нм при однократном воздействии на глаза. ПДУ регламентируются как в виде конкретных числовых значений, так и в виде расчетных формул в зависимости от СПИ и от интервалов длительностей одиночных импульсов $\tau_{\text{и}}$ и длительностей однократного воздействия t_B в диапазоне от $2,3 \cdot 10^{-11}$ до 10^4 с. При вычислениях ПДУ по формулам «Таблиц 3.3, 3.4» принимают $t = \tau_{\text{и}}$ или $t = t_B$.

Основные расчетные формулы СН 5804 – 91, распространяющиеся на наиболее опасный для глаз видимый спектральный диапазон 380 – 750 нм, имеют вид:

$$W_{\text{ПДУ}} = 5,9 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{t^2} \text{ Дж} - \text{для СПИ } 380 < \lambda \leq 600 \text{ нм, } t_B < 1 \text{ с,} \quad (1.2)$$

$$W_{\text{ПДУ}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2} \text{ Дж} - \text{для СПИ } 600 < \lambda \leq 750 \text{ нм, } t_B < 1 \text{ с.} \quad (1.3)$$

Принимая в формулах (1.2), (1.3) $t = t_B = 0,25$ с, получаем $W_{\text{ПДУ}} = 2,3 \cdot 10^{-5}$ Дж – для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $W_{\text{ПДУ}} = 4,7 \cdot 10^{-5}$ Дж – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм. Для НЕПР ЛИ и ИМ ЛИ, применяя формулу $P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} / t$, получаем $P_{\text{ПДУ}} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} = 0,1 \text{ мВт}$ – для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $P_{\text{ПДУ}} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} = 0,2 \text{ мВт}$ – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм.

В СН введено дополнительное нормирование по хроническому воздействию ЛИ. В соответствии с СН: «**Хроническое воздействие лазерного излучения** – систематически повторяющееся воздействие, которому подвергаются люди, профессионально связанные с лазерным излучением»; «**Предельно допустимые уровни лазерного излучения при хроническом воздействии** – уровни излучения, воздействие которых при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводит к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья работающего в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений».

Далее будем обозначать ПДУ лазерного излучения при хроническом воздействии как ПДУ_{ХР}. В СН указано, что для определения ПДУ_{ХР} в СПИ 180 – 380 нм и 380 – 1400 нм необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие значения ПДУ по однократному воздействию, приведенные в «Таблицах 3.3, 3.4».

В «Методике проведения специальной оценки условий труда» (утв. приказом Минтруда России от 24.01.2014 г., № 33н.) [29] установлены критерии разграничения

условий труда по степени их вредности и опасности для организма работающих. В Приложении № 18 к «Методике СОУТ» [29] регламентированы «классы (подклассы) условий труда при действии неионизирующих электромагнитных излучений оптического диапазона (**лазерное**, ультрафиолетовое)» и представлена таблица, в которой условия труда при наличии ЛИ отнесены к «допустимым» или «вредным подкласса 3.1» в зависимости от соотношения уровней лазерного излучения на рабочих местах с ПДУ_{ХР} (подробнее см. § 2.1).

Приведенные выше определения для «хронического воздействия лазерного излучения» и «ПДУ при хроническом воздействии» распространяется лишь на случаи применения ЛИЗ в производственных условиях, однако лазерные изделия давно уже вышли за стены промышленных цехов и научных лабораторий. При этом значительно возрастает риск неблагоприятного воздействия ЛИ на гражданских лиц, никак не связанных профессионально с лазерным излучением. Разработчики СН предусмотрели возможность снижения рисков несанкционированного воздействия ЛИ путем *применения ПДУ по хроническому воздействию к отдельным категориям гражданского населения*. Так в пункте (п.) 3.11 СН установлены непромышленные области применения ЛИЗ, в которых следует применять ПДУ_{ХР}.

«3.11. При использовании лазеров в театрально-зрелищных мероприятиях и для демонстраций в учебных заведениях **предельно допустимые уровни** для всех участников (зрители, актеры, студенты, школьники, преподаватели, обслуживающий персонал и др.) **устанавливаются в соответствии с нормами для хронического облучения**».

В действующих сегодня зарубежных нормативных документах по ЛБ отсутствуют гигиенические нормативы по хроническому воздействию ЛИ как в условиях производства, так и при использовании ЛИЗ на ОНР, когда существуют риски облучения лиц из гражданского населения.

В таблицах 1.1, 1.2 приведены формулы и результаты вычислений ПДУ по СН и МРЕ по ИЕС-1 для наиболее распространенных длин волн ЛИ в видимой и ближней ИК области спектра: 445, 532, 635, 905, 1064, 1070 нм. В таблицах 1.1, 1.2 приведены также значения коэффициентов несоответствия $k_{\text{МРЕ/ПДУ}} = P_{\text{МРЕ}}/P_{\text{ПДУ}}$ (таблица 1.1) и $k_{\text{МРЕ/ПДУ}} = W_{\text{МРЕ}}/W_{\text{ПДУ}}$ (таблица 1.2). Из таблицы 1.1 следует, что значения ПДУ для НЕПР ЛИ по СН в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм, значительно отличаются от значений МРЕ, приведенных в ИЕС-1, причем *значения ПДУ для наиболее опасных длин волн 445, 532 нм отличаются на порядок от соответствующих значений МРЕ*, т.е. значения ПДУ в 10 раз меньше значений МРЕ. Это, в свою очередь, означает, что *отечественные гигиенические нормативы ЛИ для указанных длин волн являются на порядок более*

жесткими, чем нормативы ЛИ, применяемые за рубежом. Этот вывод справедлив и для таблицы 1.2, но в случае ИМП ЛИ различия в значениях ПДУ и МРЕ не столь значительны (наибольшее значение $k_{\text{МРЕ/ПДУ}} = W_{\text{МРЕ}} / W_{\text{ПДУ}} = 2,6$).

Т а б л и ц а 1.1 – Значения ПДУ и МРЕ при воздействии на глаза непрерывного лазерного излучения для длин волн 445, 532, 635, 905, 1064, 1070 нм*

λ , нм	СН 5804 – 91	IEC 60825-1	$k_{\text{МРЕ/ПДУ}}$
445; 532	$W_{\text{ПДУ}} = 5,9 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$ Дж = $2,3 \cdot 10^{-5}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{\text{ЗР}}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $6,0 \cdot 10^{-1}$ Дж·м ⁻² ; $P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} t^{-1}$ Вт = $1,0 \cdot 10^{-4}$ Вт = 0,1 мВт	$H_{\text{МРЕ}} = 18 t^{0,75}$ Дж·м ⁻² = $6,4$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}}$ Дж = $2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж; $P_{\text{МРЕ}} = W_{\text{МРЕ}} t^{-1}$ Вт = $9,9 \cdot 10^{-4}$ Вт \approx 1,0 мВт	10,0
635	$W_{\text{ПДУ}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$ Дж = $4,7 \cdot 10^{-5}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{\text{ЗР}}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $1,2 \cdot 10^{-1}$ Дж·м ⁻² ; $P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} t^{-1}$ Вт = $2,0 \cdot 10^{-4}$ Вт = 0,2 мВт	$H_{\text{МРЕ}} = 18 t^{0,75}$ Дж·м ⁻² = $6,4$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}}$ Дж = $2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж; $P_{\text{МРЕ}} = W_{\text{МРЕ}} t^{-1}$ Вт = $9,9 \cdot 10^{-4}$ Вт \approx 1,0 мВт	5,0
905	$P_{\text{ПДУ}} = 3 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$ Вт = $1,4 \cdot 10^{-4}$ Вт = 0,14 мВт ; $E_{\text{ПДУ}} = P_{\text{ПДУ}} \cdot S_{\text{ЗР}}^{-1}$ Вт·м ⁻² = $3,6$ Вт·м ⁻²	$E_{\text{МРЕ}} = 10 C_4$ Вт·м ⁻² = $28,2$ Вт·м ⁻² , $C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)} = 2,82$; $P_{\text{МРЕ}} = E_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}}$ Вт = $1,1 \cdot 10^{-3}$ Вт = 1,1 мВт	7,9
1064, 1070	$P_{\text{ПДУ}} = 7,4 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$ Вт = $3,46 \cdot 10^{-4}$ Вт = 0,35 мВт ; $E_{\text{ПДУ}} = P_{\text{ПДУ}} \cdot S_{\text{ЗР}}^{-1}$ Вт·м ⁻² = $9,1$ Вт·м ⁻²	$E_{\text{МРЕ}} = 10 C_4 C_7$ Вт·м ⁻² ; $C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)} = 5,13$; $C_7 = 1$; $E_{\text{МРЕ}} = 51,3$ Вт·м ⁻² ; $P_{\text{МРЕ}} = E_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}}$ Вт = $2 \cdot 10^{-3}$ Вт = 2,0 мВт	5,7
* Полу жирным курсивом выделены значения сравниваемых параметров и значения $k_{\text{МРЕ/ПДУ}}$. Примечание – При расчетах принимали: $t = t_{\text{В}} = 0,25$ с для $\lambda = 445, 532, 635$ нм; $t = t_{\text{В}} = 10$ с для $\lambda = 905, 1064, 1070$ нм; $S_{\text{ЗР}} = 3,85 \cdot 10^{-5}$ м ² .			

На рисунке 1.7 показана зависимость $k_{\text{МРЕ/ПДУ}} = P_{\text{МРЕ}}/P_{\text{ПДУ}}$ от λ для НЕПР ЛИ, генерируемого в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм, при однократном воздействии на глаз человека. Рисунок 1.7 по существу показывает, во сколько раз бóльшую степень надежности безопасности здоровья человека в наиболее опасной для глаз области спектра обеспечивает отечественная методика нормирования лазерного излучения по сравнению с западной методикой, реализованной в стандартах по ЛБ, принятых в МЭК.

ПДУ, нормируемые в СанПин 2.2.4 3359 [18] и СН 5804, практически идентичны и различаются лишь формой выражения, а именно, в СН нормируются уровни мощности $P_{\text{ПДУ}}$, Вт (энергии $W_{\text{ПДУ}}$, Дж), прошедшей через зрачок глаза диаметром 7 мм, а в СанПин нормируется облученность $E_{\text{ПДУ}}$, Вт·м⁻² (энергетическая экспозиция $H_{\text{ПДУ}}$, Дж·м⁻²), усредненная по зрачку диаметром 7 мм. В обоих санитарно-гигиенических НД (СГ НД) приводятся простые формулы, позволяющие переходить от одних энергетических параметров нормирования к другим.

Из рассмотренного выше следует, что гигиенические нормативы ЛИ принятые в ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 идентичном стандарту IEC 60825-1:2007 противоречат ПДУ,

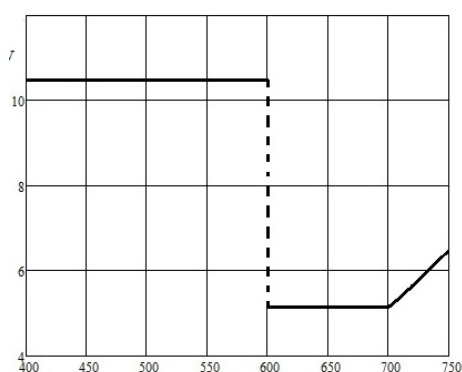
регламентированным в СН 5804 – 91 и в СанПин 2.2.4 3359. Применение ПДУ (МРЕ) по ГОСТ ИЕС-1 значительно понижает уровень безопасности лазерного излучения.

Т а б л и ц а 1.2 – Значения ПДУ и МРЕ при воздействии на глаза импульсного лазерного излучения с длительностью импульса 10^{-8} , 10^{-6} , 10^{-3} с для длин волн: 445, 532, 635, 905, 1064, 1070 нм*

λ , нм	$t_{\text{И}}$, с	СН 5804 – 91	ИЕС 60825-1	$k_{\text{МРЕ/ПДУ}}$
445; 532	10^{-8} , 10^{-6}	$W_{\text{ПДУ}} = 8,0 \cdot 10^{-8}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $2,1 \cdot 10^{-3}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $1,9 \cdot 10^{-7}$ Дж	2,4
	10^{-3}	$W_{\text{ПДУ}} = 5,9 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$ Дж = $6,0 \cdot 10^{-7}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $1,6 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 18 t^{0,75}$ Дж·м ⁻² = $0,1$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $3,8 \cdot 10^{-6}$ Дж	6,3
635	10^{-8} , 10^{-6}	$W_{\text{ПДУ}} = 1,6 \cdot 10^{-7}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $4,2 \cdot 10^{-3}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $1,9 \cdot 10^{-7}$ Дж	1,2
	10^{-3}	$W_{\text{ПДУ}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$ Дж = $1,2 \cdot 10^{-6}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $3,1 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 18 t^{0,75}$ Дж·м ⁻² = $0,1$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $3,9 \cdot 10^{-6}$ Дж	3,3
905	10^{-8} , 10^{-6}	$W_{\text{ПДУ}} = 4,0 \cdot 10^{-7}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $1,1 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 5,0 \cdot 10^{-3} C_4$ Дж·м ⁻² ; $C_4 = 2,57$; $H_{\text{МРЕ}} = 1,3 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $1,1 \cdot 10^{-6}$ Дж	2,8
	10^{-3}	$W_{\text{ПДУ}} = 3,0 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$ Дж = $3,0 \cdot 10^{-6}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $8 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 18 t^{0,75} C_4$ Дж·м ⁻² ; $H_{\text{МРЕ}} = 2,6 \cdot 10^{-1}$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $1,0 \cdot 10^{-5}$ Дж	3,3
1064, 1070	10^{-8} , 10^{-6}	$W_{\text{ПДУ}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $2,6 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 5 \cdot 10^{-2} C_7$ Дж·м ⁻² ; $C_7 = 1$; $H_{\text{МРЕ}} = 5,0 \cdot 10^{-2}$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $1,9 \cdot 10^{-6}$ Дж	1,9
	10^{-3}	$W_{\text{ПДУ}} = 7,4 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$ Дж = $7,4 \cdot 10^{-6}$ Дж; $H_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} \cdot S_{3P}^{-1}$ Дж·м ⁻² = $1,9 \cdot 10^{-1}$ Дж·м ⁻²	$H_{\text{МРЕ}} = 90 t^{0,75} C_7$ Дж·м ⁻² = $5,0 \cdot 10^{-1}$ Дж·м ⁻² ; $W_{\text{МРЕ}} = H_{\text{МРЕ}} \cdot S_{3P}$ Дж = $1,9 \cdot 10^{-5}$ Дж	2,6

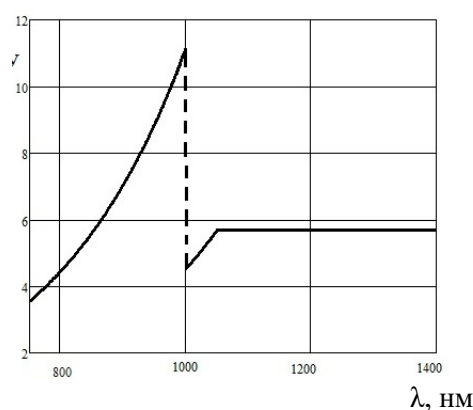
* Полу жирным курсивом выделены значения сравниваемых параметров и значения $k_{\text{МРЕ/ПДУ}}$

$k_{\text{МРЕ/ПДУ}}$



а

$k_{\text{МРЕ/ПДУ}}$



б

Рисунок 1.7 – Зависимость $k_{\text{МРЕ/ПДУ}} = P_{\text{МРЕ}}/P_{\text{ПДУ}}$ от длины волны лазерного излучения λ :
а – СПИ 380 – 750 нм, $t_{\text{В}} = 0,25$ с; б – СПИ 750 – 1400 нм, $t_{\text{В}} = 10$ с

Таким образом, мы видим, что в области лазерной безопасности существует ситуация которую можно было бы условно назвать «правовой коллизией», заключающейся в существенных противоречиях между нормативно-правовыми документами по ЛБ в части несоответствия регламентируемых гигиенических нормативов лазерной безопасности ПДУ и МРЕ. В России нормативные документы в ранге санитарных правил и норм являются частью санитарного законодательства, базирующегося на Федеральном законе от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [70] (далее ФЗ № 52). Кроме того существует «Положение о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании» (утв. постановлением Правительства РФ от 24 июня 2000 г. №554) [71] (далее «Положение»), в котором имеется пункт «11. Нормативные правовые акты, касающиеся санитарно-эпидемиологического благополучия населения, принимаемые федеральными органами исполнительной власти, **государственные стандарты ... не должны противоречить санитарным правилам**». То есть нормативный документ СН 5804 является подзаконным нормативно-правовым *актом обязательного применения*, и нарушение его требований ведет к юридической ответственности в соответствии с действующим у нас в стране законодательством.

Из рассмотренного выше следует, что ГОСТ ИЕС 60825-1 – 2013 противоречит действующим в РФ ФЗ № 52 и «Положению» №554 от 24.06.2000 г. *Действие ГОСТ ИЕС 60825-1 должно быть ограничено лишь лазерной продукцией, предназначенной для экспорта.*

1.3 Классификация лазерных изделий по степени опасности лазерного излучения и несоответствия отечественной и зарубежной СКЛ

1.3.1 Классификация ЛИЗ по стандарту ИЕС 60825 – 1:2007

Под схемой классификации (СКЛ) лазерной продукции будем понимать перечень классов ЛИЗ по степени потенциальной опасности с соответствующими определениями (дефинициями) классов в совокупности с перечнем конкретных значений выходных энергетических параметров ЛИ, которые назовем *классификационными уровнями* (КУ), отделяющими один класс опасности ЛИЗ от другого. В СКЛ регламентируются не только конкретные значения КУ, но и формулы для их вычисления. Часть СКЛ, включающую перечень классов ЛИЗ и их дефиниции, будем называть описательной частью СКЛ, а часть СКЛ, включающую перечень значений КУ и формул для их вычисления, будем называть количественной частью СКЛ.

Схема классификации из первой редакции стандарта IEC 825 – 1984 регламентировала 5 классов ЛИЗ (1, 2, 3А, 3В, 4). В последующие годы описательная и количественная части СКЛ из этого стандарта неоднократно дорабатывались. В редакции стандарта МЭК 2007-го года (IEC-1) в отличие от редакции 1984 г. регламентируется СКЛ, состоящая из семи классов ЛИЗ: 1, 1М, 2, 2М, 3R, 3В, 4. Основным параметром классификации, названный автором выше «классификационный уровень», в IEC-1 называется «accessible emission limit, AEL» (предел доступной эмиссии, ПДЭ). Описательная часть СКЛ ЛИЗ из IEC-1 (и из ГОСТ IEC-1 идентичного IEC-1) с некоторыми сокращениями и уточнениями приведена в Таблице 1.3.

Приведем комментарии к описаниям классов ЛИЗ по IEC-1, ГОСТ IEC-1.

Т а б л и ц а 1.3 – Описания классов ЛИЗ по IEC 60825-1, ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 и дефиниции классов по СН 5804 – 91

Кл.№	IEC 60825-1, ГОСТ IEC 60825-1 – 2013	Кл.№	СН 5804 – 91
1	Лазерная аппаратура, которая безопасна при любых обоснованно предсказуемых условиях работы, включая длительное прямое наблюдение в пучке, даже в случаях, когда экспозиция происходит через оптические устройства наблюдения. К классу 1 также относятся лазеры большой мощности, полностью закрытые так, что исключаются потенциальные опасности излучения (встроенная лазерная аппаратура).	I	К лазерам I класса относятся полностью безопасные лазеры, то есть такие лазеры, выходное коллимированное излучение которых не представляет опасности при облучении глаз и кожи.
1М	Лазерная аппаратура, которая безопасна , включая длительное прямое наблюдение в пучке. Когда экспозиция происходит через оптические устройства, МДЭ может быть превышен, облучение может вызвать повреждение глаз при условиях: а) расходящегося пучка, если пользователь располагает оптические компоненты в пределах 100 мм от источника коллимированного пучка; б) для коллимированного пучка с диаметром больше 7 мм.		<i>Аналогичный класс отсутствует</i>
2	Лазеры, испускающие видимое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, безопасны при мгновенном облучении, но могут быть опасны (???) при непосредственном облучении пучком широко открытых глаз. Временная база 0,25 с принята при определении класса. Использование оптических устройств не повышает риск облучения глаз.	II	Лазеры II класса – это лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении кожи или глаз человека коллимированным пучком ; диффузно отраженное излучение безопасно как для кожи, так и для глаз.
2М	Лазеры, испускающие видимое излучение и безопасные для невооруженного глаза. Повреждение глаз может быть связано с экспозицией через оптические устройства наблюдения при условиях: (с.м. а), б) для класса 1М). Лазерная аппаратура класса 2М может вызвать длительное или кратковременное ослепление.		<i>Аналогичный класс отсутствует</i>
3R	Лазеры, излучение которых может превысить МДЭ при прямом наблюдении в пучке, однако риск повреждения незначителен , поскольку ПДЭ только в пять раз выше, чем ПДЭ для класса 2 (в видимом диапазоне) или для класса 1 для других длин волн.		<i>Аналогичный класс отсутствует</i>

	Лазерная аппаратура класса 3R может вызвать длительное или кратковременное ослепление.		
--	--	--	--

Продолжение таблицы 1.3

3B	Лазеры, непосредственное наблюдение пучка которых опасно даже при кратковременном облучении. Наблюдение диффузного отражения не опасно, однако значение экспозиции может превысить МДЭ при длительности наблюдения в видимом диапазоне не менее 10 с и наблюдении с расстояния менее 13 см.	III	К лазерам III класса относятся лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении глаз не только коллимированным, но и диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от отражающей поверхности и (или) при облучении кожи коллимированным излучением. Диффузно отраженное излучение не представляет опасности для кожи. Класс распространяется только на лазеры, генерирующие излучение в спектральном диапазоне II.
4	Лазерная аппаратура, которая представляет опасность при наблюдении в пучке и экспозиции кожи или наблюдении диффузного отражения.	IV	Четвертый (IV) класс включает такие лазеры, диффузно отраженное излучение которых представляет опасность для глаз и кожи на расстоянии 10 см от отражающей поверхности.

Из описания класса I следует, что *к безопасному классу I могут относиться ЛИЗ, содержащие внутри опасные лазерные устройства более высокого класса опасности.* Заметим, что данное утверждение противоречит сформулированному в СН 5804 принципу классификации, в соответствии с которым *класс ЛИЗ определяется встроенным в него лазером* (подробнее схему классификации по СН рассмотрим далее).

Из описания класса 1M следует, что выходное излучение ЛИЗ класса 1M потенциально опасно, когда для наблюдения используются оптические устройства. Подобный подход противоречит основному принципу классификации, принятому в России, в соответствии с которым *классификация ЛИЗ проводится с учетом значений ЭП ЛИ исключительно в плоскости выходного окна ЛИЗ*, а не на выходе неких оптических систем, не входящих в состав ЛИЗ. Вопрос учета оптических устройств при оценке безопасности эксплуатации ЛИЗ относится к задаче оценки степени вредности (опасности) ЛИ на рабочих местах, т.е. *к вопросам, решаемым методами контроля (дозиметрии), а отнюдь не методами классификации ЛИЗ.*

Из описания класса 2 следует, что ЛИЗ, отнесенные к этому классу, отличаются от ЛИЗ класса 1 ограничением спектрального диапазона лишь видимой областью и регламентированным временем воздействия $t_B = 0,25$ с. При этом в формулировке *имеется противоречие: «безопасны..., но могут быть опасны».* Такие формулировки в нормативных документах по безопасности неприемлемы. Естественно, ЛИЗ *класса 2*

должны считаться опасными, а не «безопасными» для глаз. Соответственно, лазеры класса 2M также должны расцениваться как опасные для глаз.

Из описания класса 3R следует, что прямое излучение ЛИЗ, отнесенных к этому классу, создает «незначительный риск» повреждения глаз. При этом уровень ЛИ на роговице глаза может *в 5 раз превысить МДЭ (МРЕ). Лазеры класса 3R безусловно должны расцениваться как опасные для глаз.*

Из описания класса 3B следует, что прямое излучение ЛИЗ, отнесенных к этому классу, безусловно опасно для глаз, кроме того диффузно отраженное лазерное излучение (ДИФ ЛИ) может быть опасным для глаз при наблюдении отражающих поверхностей с небольших дистанций.

Из описания класса 4 следует, что прямое ЛИ и ДИФ ЛИ лазерных изделий этого класса опасно для глаз, кроме того их прямое ЛИ опасно для кожи. О возникновении опасности ДИФ ЛИ для кожи, которая, естественно, возникает при высоких уровнях выходного ЛИ, ничего не сказано.

Рассмотрим количественную часть СКЛ, регламентированную в ИЕС-1. Формулы для вычисления КУ (AEL) для ЛИЗ класса 1 приведены в таблице В.3 Приложения В, представляющей собой фрагмент «Table 4» из стандарта ИЕС-1. Основная расчетная формула для вычисления значения первого КУ W_{AEL1} по ИЕС-1, распространяющаяся на наиболее опасный для глаз видимый спектральный диапазон 400 – 700 нм, имеет вид

$$W_{AEL1} = 7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} \text{ J.} \quad (1.4)$$

Принимая в формуле (1.4) $t = t_B = 0,25$ с, получаем $W_{AEL1} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж. Для непрерывного ЛИ и ИМ ЛИ, применяя формулу $P_{AEL1} = W_{AEL1}/t$, получаем $P_{AEL1} = 1$ мВт, т.е., как и следовало ожидать, $P_{AEL1} = P_{MPE} = 1 \text{ мВт}$.

1.3.2 Классификация ЛИЗ по ГОСТ 12.1.040 и СН 5804

Впервые вопрос о необходимости классификации лазерной техники в нашей стране был поставлен Рахмановым Б. Н. и Чистовым Е. Д. [67] в 1981 г., а затем схема классификации, включающая только описательную часть СКЛ, была регламентирована в ГОСТ 12.1.040 – 83 (далее ГОСТ-1). Приведем выдержки из ГОСТ-1 [16].

«2.3. По степени опасности генерируемого излучения лазеры (лазерные установки) подразделяются на **четыре** класса.

Выходное излучение не представляет опасности для глаз и кожи – лазеры (лазерные установки) 1-го класса.

Выходное излучение представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением – лазеры (лазерные установки) 2-го класса.

Выходное излучение представляет опасность при облучении глаз прямым, зеркально отраженным, а также диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности, и (или) при облучении кожи прямым и зеркально отраженным излучением – лазеры (лазерные установки) 3-го класса.

Выходное излучение представляет опасность при облучении кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности – лазеры (лазерные установки) 4-го класса».

В действующих сегодня СН 5804 [17] регламентирована схема классификации ЛИЗ, количественная часть которой основана на применении расчетных формул для определения КУ. Описательная часть СКЛ по СН [17], состоящей из 4-х классов, приведена в таблице 1.3. Заметим, что «Определение класса лазера основано на учете его **выходной энергии (мощности) и предельно допустимых уровней при однократном воздействии** генерируемого излучения» [17]. При этом в СН указано, что при вычислении ПДУ: «длительность воздействия непрерывного излучения в диапазоне свыше 380 до 750 нм принимается равной 0,25 с»; «длительность воздействия непрерывного излучения в диапазоне от 180 до 380 и свыше 750 нм принимается равной 10 с».

Сравнивая определения классов опасности ЛИЗ по ГОСТ-1 [16] и по СН [17], видим, что, несмотря на некоторые различия в текстах, классы, установленные в ГОСТ-1 и СН, идентичны. Рассмотрим следующее требование к классификации из раздела 4 СН.

«4.9. Класс опасности лазерного изделия определяется классом используемого в нем лазера». Эта формулировка противоречит описанию класса 1 по ИЕС-1, в соответствии с которой ЛИЗ с «встроенной лазерной аппаратурой» большой мощности (с аппаратурой классов 3В, 4), не допускающие выход ЛИ наружу в процессе эксплуатации, относятся к безопасному классу 1. Разработчики ИЕС-1 не учли, что на рабочих местах приходится проводить пуско-наладочные и ремонтные работы (ПНРР), которые выполняют при снятии защитных блокировок и при открытом кожухе ЛИЗ. В таких условиях контакт человека с ЛИ, генерируемым встроенным лазерным излучателем, неизбежен. Именно такие *наиболее неблагоприятные условия взаимодействия человека с ЛИ и принимается в расчет при классификации ЛИЗ* по СН.

Рассмотрим количественную часть СКЛ из СН [17]. В таблице Г.3 приведен фрагмент «Таблицы 4.1» из СН, относящийся к диапазону от 380 до 1400 нм. Приведем пример расчетов классификационных уровней $P_{КУ}$ для ЛИЗ, генерирующих НЕПР ЛИ *в наиболее опасном для глаз СПИ 380 – 600 нм*. К таким ЛИЗ относятся, например, лазерные

указки. ПДУ ЛИ для ЛУК, генерирующих ЛИ на наиболее опасных для глаз длинах волн $\lambda = 445$ нм и $\lambda = 532$ нм равны $P_{\text{ПДУ}} = 0,1 \text{ мВт}$ (см. таблицу 1.1). Для ЛИЗ класса I значение КУ в соответствии с таблицей Г.4 будет равно $P_{\text{КУ1}} = P_{\text{ПДУ}} = 0,1 \text{ мВт}$. Для ЛИЗ класса II значение КУ в соответствии с таблицей Г.4 будет равно $P_{\text{КУ2}} = 8 \cdot 10^2 P_{\text{ПДУ}} = 80 \text{ мВт}$. Для ЛУК с красными пучками ЛИ ($\lambda = 635$ нм) $P_{\text{ПДУ}} = 0,2 \text{ мВт}$ (см. таблицу 1.1), тогда получаем $P_{\text{КУ1}} = P_{\text{ПДУ}} = 0,2 \text{ мВт}$; $P_{\text{КУ2}} = 8 \cdot 10^2 P_{\text{ПДУ}} = 160 \text{ мВт}$.

Для ЛИЗ класса III, значение КУ для всех трех λ в соответствии с таблицей Г.3 будет равно $E_{\text{КУ3}} = \pi \cdot 10^{-2} E_{\text{ПДУ к}}(t) \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$, где $E_{\text{ПДУ к}}(t)$ – ПДУ облученность участка кожи с нормируемым диаметром 1,1 мм. Отсюда $P_{\text{КУ3}} = E_{\text{КУ3}} S_{\text{ПДУ к}} = \pi \cdot 10^4 P_{\text{ПДУ к}} \text{ Вт}$, где $P_{\text{ПДУ к}}$ – ПДУ мощности ЛИ, прошедшего через апертуру диаметром 1,1 мм. По «Таблице 3.6» из СН [17] находим, что для кожи $P_{\text{ПДУ к}}(t) = 10^{-6} E_{\text{ПДУ к}}(t) \text{ Вт}$, где $E_{\text{ПДУ к}}(t) = 5 \cdot 10^3 / t^{0,5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$. Для $t = 10$ с имеем $E_{\text{ПДУ к}} = 5 \cdot 10^3 / 10^{0,5} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 = 1582 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$, $P_{\text{ПДУ к}}(t) = 10^{-6} E_{\text{ПДУ к}} \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 1,6 \text{ мВт}$; $P_{\text{КУ3}} = \pi \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \approx 50 \text{ Вт}$.

В последние годы в интернете потребителям предлагаются ЛУК, имеющие крайне **большую мощность излучения, достигающую единиц и даже десятков ватт!** То есть, обычным гражданским потребителям безо всяких ограничений предлагаются крайне **опасные лазерные изделия III-го класса опасности, соответствующие поддиапазону мощностей, близко примыкающему к чрезвычайно опасному IV-му классу ($P \geq 50 \text{ Вт}$)**. Такие ЛИЗ способны мгновенно прожечь сетчатку глаза человека. Кроме того такие ЛИЗ являются источником повышенной пожароопасности. В интернете распространяются видеоролики, в которых с помощью мощных ЛУК в течение нескольких секунд поджигают удаленные на несколько метров листы бумаги и картона, а также прожигают отверстия в пластиковых конструкциях. **Продажа подобных ЛИЗ недопустима и незаконна!** Дело в том, что в СН [17] имеются ограничительные требования, которыми пренебрегают многие продавцы достаточно мощной лазерной продукции:

«6.19. В лазерных изделиях, предназначенных для использования в театрально-зрелищных мероприятиях, учебных заведениях, **на открытых пространствах ... запрещается применение лазеров III, IV класса».**

«7.18. Безопасное применение лазерных изделий на строительстве, при демонстрациях в учебных заведениях, в театрально-зрелищных мероприятиях и **на открытых пространствах** должно обеспечиваться организационно-техническими мероприятиями... В указанных случаях **запрещается применение лазерных изделий III и IV класса».**

Таким образом, в соответствии с пунктами 6.19 и 7.18 СН [17] **в нашей стране уже с 1991 года запрещено применение ЛИЗ, предназначенных для работы на ОПР и**

имеющих в СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм мощность ЛИ более 80 мВт, а в СПИ 600 $< \lambda \leq 750$ нм – мощность ЛИ более 160 мВт (т.е. ЛИЗ III-го и IV-го классов опасности). Совершенно очевидно, что поскольку на ОПР запрещено применение ЛИЗ III, IV классов, то **нельзя и продавать подобные изделия без специального разрешения.**

Приведем таблицу 1.4, наглядно подтверждающую противоречия между значениями классификационных уровней, регламентированных в СН и в стандарте ИЕС-1.

Т а б л и ц а 1.4 – Классификационные уровни (КУ) по СН 5804 – 91 и пределы доступной эмиссии (AEL) по ИЕС 60825 – 1:2007 для лазерных изделий, работающих в режиме непрерывного излучения на длинах волн: 445, 532, 635, 905, 1064, 1070 нм при длительностях воздействия $t_B = 0,25$ с (445, 532, 635 нм) и $t_B = 10$ с (905, 1064, 1070 нм)

СН 5804 – 91			ИЕС 60825 – 1:2007		
Кл. №	λ , нм	$W_{КУ}, (P_{КУ})$	Кл. №	λ , нм	$W_{AEL}, (P_{AEL})$
I	445, 532	$W_{КУ1} = W_{ПДУ} = 2,3 \cdot 10^{-5}$ Дж ($P_{КУ1} = P_{ПДУ} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ Вт)	1,1М, 2, 2М	445, 532	$W_{AEL1} = 7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_6 J = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж ($C_6 = 1$); $P_{AEL1} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ Вт ($k_{AEL1/KY1} = 10,0$)
	635	$W_{КУ1} = W_{ПДУ} = 4,6 \cdot 10^{-5}$ Дж ($P_{КУ1} = P_{ПДУ} = 2,0 \cdot 10^{-4}$ Вт)		635	$W_{AEL1} = 7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_6 J = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж ($C_6 = 1$); $P_{AEL1} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ Вт ($k_{AEL1/KY1} = 5,0$)
	905	$P_{КУ1} = P_{ПДУ} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ Вт ($W_{КУ1} = W_{ПДУ} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ Дж)	1, 1М	905	$W_{AEL1} = 7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_6 C_4 J = 1,1 \cdot 10^{-2}$ Дж ($C_6 = 1, C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)} = 2,82$) $P_{AEL1} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ Вт ($k_{AEL1/KY1} = 7,9$)
	1064, 1070	$P_{КУ1} = P_{ПДУ} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Вт ($W_{КУ1} = W_{ПДУ} = 3,5 \cdot 10^{-3}$ Дж)	1, 1М	1064, 1070	$W_{AEL1} = 3,5 \cdot 10^{-3} t^{0,75} C_6 C_7 J = 2,0 \cdot 10^{-2}$ Дж ($C_6 = C_7 = 1$), ($P_{AEL1} = 2,0 \cdot 10^{-3}$ Вт; $k_{AEL1/KY1} = 5,7$)
II	445, 532	$W_{КУ2} = 800 W_{ПДУ} = 1,8 \cdot 10^{-2}$ Дж ($P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 8,0 \cdot 10^{-2}$ Вт)	3R	445, 532	$P_{AEL 3R} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ Вт ($k_{AEL 3R / KY2} = 0,06$)
	635	$W_{КУ2} = 800 W_{ПДУ} = 3,6 \cdot 10^{-2}$ Дж ($P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 1,6 \cdot 10^{-1}$ Вт)		635	$P_{AEL 3R} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ Вт ($k_{AEL 3R / KY2} = 0,03$)
	905	$P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 1,1 \cdot 10^{-1}$ Вт ($W_{КУ2} = W_{ПДУ} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ Дж)		905	$W_{AEL 3R} = 3,5 \cdot 10^{-3} t^{0,75} C_4 J = 5,6 \cdot 10^{-2}$ Дж $C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)} = 2,82$ $P_{AEL 3R} = 5,6 \cdot 10^{-3}$ Вт ($k_{AEL 3R / KY2} = 0,05$)
	1064, 1070	$P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 2,8 \cdot 10^{-1}$ Вт ($W_{КУ2} = W_{ПДУ} = 2,8 \cdot 10^{-2}$ Дж)		1064, 1070	$W_{AEL 3R} = 1,8 \cdot 10^{-2} t^{0,75} C_7 J = 1,0 \cdot 10^{-1}$ Дж ($C_7 = 1$) $P_{AEL 3R} = 1,0 \cdot 10^{-2}$ Вт ($k_{AEL 3R / KY2} = 0,04$)
II	445, 532	$P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 8,0 \cdot 10^{-2}$ Вт	3B	445, 532	$P_{AEL 3B} = 0,5$ Вт ($k_{AEL 3B / KY2} = 6,25$)
	635	$P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 1,6 \cdot 10^{-1}$ Вт		635	$P_{AEL 3B} = 0,5$ Вт ($k_{AEL 3B / KY2} = 6,3$)
	905	$P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 1,1 \cdot 10^{-1}$ Вт		905	$P_{AEL 3B} = 0,5$ Вт ($k_{AEL 3B / KY2} = 3,1$)
	1064, 1070	$P_{КУ2} = 800 P_{ПДУ} = 2,8 \cdot 10^{-1}$ Вт		1064, 1070	$P_{AEL 3B} = 0,5$ Вт ($k_{AEL 3B / KY2} = 1,8$)
III	445, 532, 635	$P_{КУ3} = \pi \cdot 10^4 P_{ПДУ К} = 50$ Вт	4	445, 532, 635, 910, 1064, 1070	$P > 0,5$ Вт
	910, 1064, 1070	$P_{КУ3} = \pi \cdot 10^2 E_{ПДУ К} = 100$ Вт			
IV	445, 532, 635	$P > 50$ Вт			
	910, 1064, 1070	$P > 100$ Вт			

Как следует из таблицы 1.4, ни количество классов, ни их условные обозначения, используемые в западных схемах классификации, не соответствуют количеству классов и условным обозначениям, принятым в СКЛ по СН 5804. Однако самое главное противоречие заключается в том, что все значения западных классификационных уровней (AEL) существенно отличаются от похожих по обозначению отечественных КУ. Это объясняется в основном различиями принципов классификации лазерной продукции, на которые опираются отечественная и западная схемы классификации.

1.3.3 Несоответствия СКЛ ЛИЗ по СН 5804 и по ГОСТ 31581

В 1994 году вступил в действие ГОСТ Р 50723 – 94 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий». Разработчики этого стандарта скопировали классификационную схему с действовавшего в 90-е годы стандарта МЭК 825-1:1984. Возникла ситуация внутренней правовой коллизии, заключающейся в том, что *в ГОСТ Р 50723 регламентировалась схема классификации ЛП, принципиально отличающаяся от рассмотренных выше СКЛ, регламентированных в ГОСТ 12.1.040 – 83 [16] и СН 5804 [17].*

С 1-го января 2015 года вместо ГОСТ Р 50723 в РФ в качестве национального стандарта введен в действие ГОСТ 31581 – 2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий» [72] (далее ГОСТ-2), имеющий такое же наименование, как ГОСТ Р 50723. ГОСТ-2 практически идентичен ГОСТ Р 50723 – 94 по структуре и содержанию. Рассмотрим извлечения из текста раздела 6 «Классификация лазерных изделий» ГОСТ-2.

«Класс 1. Лазерные изделия безопасные при предполагаемых условиях эксплуатации.

Класс 2. Лазерные изделия, генерирующие видимое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм. **Защита глаз обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания**». Таким образом, следует заключить, что ЛИЗ класса 2 так же безопасны по критерию воздействия излучения на глаза, как и ЛИЗ класса 1.

«Класс 3А. Лазерные изделия **безопасные для наблюдения незащищенным глазом**. Для лазерных изделий, генерирующих излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, **защита обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания**. Для других длин волн опасность для незащищенного глаза не больше чем для класса 1.

Непосредственное **наблюдение пучка, испускаемого лазерными изделиями класса 3А, с помощью оптических инструментов** (например, бинокль, телескоп, микроскоп) **может быть опасным**».

Из рассмотрения дефиниции «класса 3А» следует:

- ЛИЗ класса 3А так же безопасны для глаз как и ЛИЗ класса 1 и класса 2;
- в определении «класса 3А» нарушен один из принципов классификации, в соответствии с которым классификация ЛИЗ проводится с учетом значений ЭП ЛИ лишь в плоскости выходного окна ЛИЗ, а не на выходе неких оптических систем, не имеющих непосредственного отношения к ЛИЗ (см. выше комментарии к СКЛ из ИЕС-1).

Дефиниция класса 3А, утверждает, что «Защита глаз обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания». В п. 1.2.3 показано, что при вычислениях ПДУ для ЛИ, генерируемого в видимом СПИ, заведомо учитывается «рефлекс мигания» путем использования в вычислениях нормированного значения времени воздействия $t_B = 0,25$ с. Если считать класс 3А действительно безопасными для глаз (как интерпретируется в ГОСТ-2), то значение КУ класса 3А должно быть равно значению ПДУ, вычисленному с учетом $t_B = 0,25$ с. Однако, как будет показано далее, **вычисления для класса 3А дают значение КУ в пятьдесят раз превышающее ПДУ по СН!**

Таким образом, следует констатировать, что с 01.01.2015 г. на территории РФ введена новая (или вернее сказать «реанимирована» старая, из ГОСТ Р 50723 – 94) СКЛ ЛИЗ, состоящая из пяти классов: 1, 2, 3А, 3В, 4. Определения первых трех классов (1, 2 и 3А), приводят к выводу, что относящиеся к ним ЛИЗ, генерирующие излучение в видимой области спектра, являются безопасными для глаз человека. Возникает резонный вопрос, а зачем же эти классы разделены между собой? Для ответа на этот вопрос обратимся к количественной части СКЛ по ГОСТ-2. В таблицах Д.1 – Д.4 Приложения Д приведены в слегка видоизмененной форме фрагменты из расчетных «Таблиц А.1 – А.4» из ГОСТ-2.

Вычислим значение первого допустимого предела излучения (ДПИ) $W_{ДПИ}$ (Дж), или, по другому, значение первого классификационного уровня $W_{КУ1}$ (Дж) для ЛИЗ класса 1, генерирующих ЛИ в видимом СПИ от 400 до 700 нм. Из таблицы Д.1 имеем $W_{ДПИ} = W_{КУ1} = 7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_6$ Дж. Для лазерного пучка $C_6 = 1$. Для вычисления значения КУ в видимой области спектра необходимо принять $t = 0,25$ с. Тогда получаем $W_{КУ1} = 7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25^{0,75}$ Дж = $2,5 \cdot 10^{-4}$ Дж. Для ЛИЗ, работающего в режиме НЕПР ЛИ, например, для лазерной указки, определяем значение $P_{КУ1}$ (Вт) по формуле $P_{КУ1} = W_{КУ1} / t$. Для $t = 0,25$ с получаем $P_{КУ1} = 10^{-3}$ Вт = 1 мВт. Из таблицы Д.2 следует, что для ЛИЗ класса 2 $P_{КУ2} = P_{КУ1} = 10^{-3}$ Вт = 1 мВт. Как видим, численные значения КУ для класса 1 и класса 2 одинаковы, и **приведенное разграничение классов ничем не обосновано.**

Вычислим значение классификационного уровня $W_{КУ3А}$ (Дж) для ЛИЗ класса 3А, генерирующих ЛИ видимой области спектра. Из таблицы Д.3 имеем $W_{КУ3А} =$ $= 3,5 \cdot 10^{-3} t^{0,75} C_6$ (Дж). Для ЛИЗ, работающего в режиме НЕПР ЛИ, при $C_6 = 1$, $t = 0,25$ с

получаем $W_{\text{КУЗА}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25^{0,75} \text{ Дж} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$; $P_{\text{КУЗА}} = 4,96 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \approx 5 \text{ мВт}$. Из приведенного выше определения класса 3А следует, что **лазерные изделия с мощностью выходного излучения $P \leq 5 \text{ мВт}$ по ГОСТ-2 также безопасны для наблюдения незащищенным глазом, что категорически неверно!**

По мнению разработчиков ГОСТ-2 ЛИЗ, отнесенные к классу 3А, отличаются от ЛИЗ более низкого второго класса только тем, что возникает опасность при наблюдении лазерного пучка через некие оптические системы. Как мы уже отмечали, увязывание опасности или безопасности ЛИЗ с применением неких внешних устройств, не входящих в состав ЛИЗ, противоречит принципам классификации, принятым в СН [17] (см. выше комментарии к определениям классов 1М, 2М из ИЕС-1 (ГОСТ ИЕС-1)).

На рисунке 1.8 приведены сравнительные графики спектральной зависимости классификационных уровней $P_{\text{КУ1ГОСТ}}$ (4), $P_{\text{КУЗАГОСТ}}$ (5), $P_{\text{КУЗВГОСТ}}$ (6), вычисленных по таблицам Д.1, Д.3, Д.4 (т.е. по «Таблицам А.1, А.3, А.4» из ГОСТ-2), и $P_{\text{КУ1СН}}$ (1), $P_{\text{КУ2СН}}$ (2), $P_{\text{КУЗСН}}$ (3), вычисленных по таблице Г.3 (т.е. по «Таблице 4.1» из СН [17]).

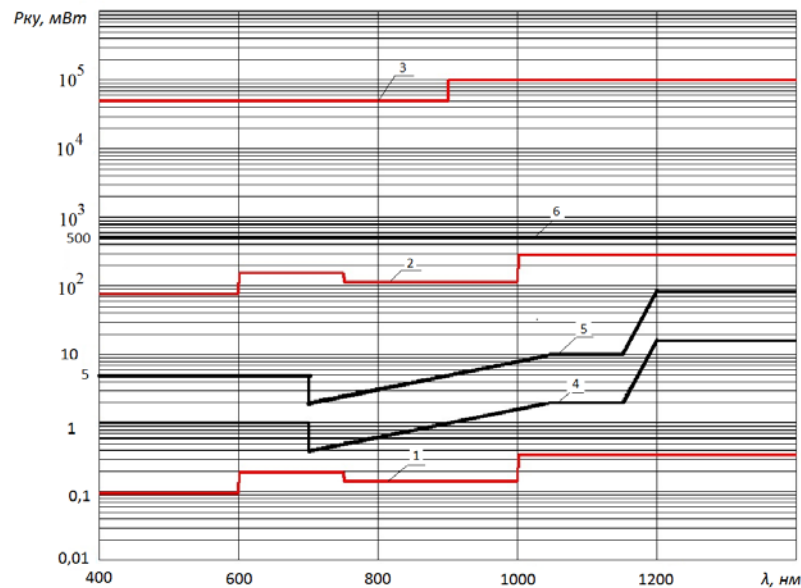


Рисунок 1.8 – Графики спектральной зависимости классификационных уровней $P_{\text{КУ1СН}}$ (1), $P_{\text{КУ2СН}}$ (2), $P_{\text{КУЗСН}}$ (3) и $P_{\text{КУ1ГОСТ}}$ (4), $P_{\text{КУЗАГОСТ}}$ (5), $P_{\text{КУЗВГОСТ}}$ (6)

Сравнивая значения $P_{\text{КУ1ГОСТ}} = 1 \text{ мВт}$, вычисленные по формулам ГОСТ-2 для ЛИЗ, работающих в видимом СПИ от 400 до 600 нм (см. 4, рисунок 1.8), со значением $P_{\text{КУ1СН}} = 0,1 \text{ мВт}$, вычисленным по таблице Г.3 (см. 1, рисунок 1.8), мы видим, что **полученные значения отличаются в 10 раз!** Сравнивая значение $P_{\text{КУЗАГОСТ}} = 5 \text{ мВт}$, вычисленное для того же СПИ (см. 5, рисунок 1.8), со значением $P_{\text{КУ1СН}} = 0,1 \text{ мВт}$ (см. 1, рисунок 1.8), мы видим, что **полученные значения отличаются в 50 раз!**

Это означает, что *нижний порог безопасности ЛИЗ в соответствии с ГОСТ 31581 завышен в 50 раз!* В свою очередь, это значит, что ЛИЗ, имеющие мощность ЛИ в диапазоне от 0,1 мВт до 5 мВт, относящиеся в настоящее время к опасным для глаз изделиям класса II по СН [17], неправомерно должны быть отнесены к категории безопасных изделий по ГОСТ-2.

Таким образом, ГОСТ 31581 – 2012 по существу в 50 раз понижает уровень безопасности лазерной продукции по сравнению с традиционно существующим в РФ уровнем.

С 2015 г. в РФ действует Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» от 29.06.2015 № 162-ФЗ [73] (далее ФЗ № 162). В ФЗ № 162 имеется статья 3 «Цели и задачи стандартизации», в соответствии с которой одной из целей является «улучшение качества жизни населения страны». Далее в этой статье указано «Цели стандартизации достигаются путем реализации следующих задач: ...»; в числе этих задач на второй позиции указывается «**повышение уровня безопасности жизни и здоровья людей**». Вряд ли можно считать, что ГОСТ 31581 – 2012, значительно понижающий уровень безопасности лазерной продукции, способствует решению указанной задачи.

Все сказанное выше может быть в полной мере отнесено и к стандарту ГОСТ ИЕС 60825-1 – 2013.

Следует еще раз отметить, что в соответствии с «Положением» №554 [71] санитарно-гигиенические НД имеют несомненный приоритет перед техническими НД в форме стандартов. *ГОСТ 31581 – 2012 должен быть гармонизирован с СН 5804 – 91 и СанПин 2.2.4.3359 – 16 в части гигиенических нормативов, используемых при классификации ЛИЗ.*

1.4 Результаты и выводы по материалам главы 1

1. Выявлены значительные несоответствия гигиенических норм лазерного излучения, регламентированных в СН 5804 – 91, СанПин 2.2.4.3359 – 16, и норм, регламентированных в стандарте ИЕС 60825-1 и в ГОСТ ИЕС 60825-1 – 2013. Значения ПДУ, установленные в СН 5804 и СанПин 2.2.4.3359 для наиболее опасной для глаз области спектра 380 – 600 нм, на порядок меньше значений МРЕ, установленных в ИЕС 60825-1 и ГОСТ ИЕС 60825-1.

2. Выявлены значительные несоответствия классификационных уровней потенциальной опасности лазерных изделий, регламентированных в СН 5804, и регламентированных в ИЕС 60825-1, ГОСТ ИЕС 60825-1 и ГОСТ 31581 – 2012.

3. Введение в действие ГОСТ ИЕС 60825-1 и ГОСТ 31581 противоречит Федеральным законам ФЗ № 162 и ФЗ № 52, а также «Положению о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании» от 24.06.2000 г. № 554, поскольку указанные стандарты в значительной степени понижают уровень безопасности лазерной продукции по сравнению с уровнями, установленными в санитарно-гигиеническом нормативном документе СН 5804.

4. Для устранения противоречий предлагаются следующие мероприятия:

- безусловное сохранение действующих ПДУ по СН 5804 в новых санитарно-гигиенических нормативных документах по ЛБ (предложение реализовано: в новых СанПин 2.2.4.3359 регламентированы ПДУ идентичные установленным в СН 5804);

- ограничение области действия ГОСТ ИЕС-1 лишь лазерной продукцией, предназначенной для экспорта;

- разработка вместо ГОСТ 31581 нового национального стандарта по ЛБ, гармонизированного с СН 5804 и СанПин 2.2.4.3359 в части ПДУ, используемых при классификации ЛИЗ.

5. По материалам главы 1 соискателем с соавторами опубликовано 13 научных статей [21 – 23, 74 – 83] в журналах «Безопасность в техносфере», «Фотоника», «Безопасность труда в промышленности», «Гигиена и санитария» и в бюллетене Лазерной ассоциации «Лазер-Информ». В работах [21 – 23, 83] рассмотрены вопросы противоречий между СН 5804, и ИЕС 60825-1 (ГОСТ ИЕС 60825-1). Вопросы несоответствия классификационных схем по СН 5804 и по ГОСТ 31581 – 2012 рассмотрены в публикациях [81, 82]. В статьях [21, 23, 74, 75] аргументированы предложения по разрешению указанных противоречий путем разработки серии новых национальных стандартов по ЛБ и путем ограничения области действия серии введенных в РФ стандартов МЭК по ЛБ лишь лазерной продукцией, предназначенной для экспорта.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДОЗИМЕТРИИ В ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ПИЛОТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

2.1 Общая постановка задачи количественной оценки степени опасности лазерного излучения и специальной оценки условий труда при воздействии ЛИ

В настоящее время термин «дозиметрия лазерного излучения» определяется стандартом ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 «ССБТ. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения» [34] следующим образом: «**дозиметрия лазерного излучения:** комплекс методов определения значений параметров лазерного излучения в заданной точке пространства с целью определения степени его опасности для организма человека». Сущность лазерной дозиметрии (ЛДОЗ) заключается в определении расчетным или инструментальным методом энергетических параметров ЛИ в заданной точке пространства и сравнении полученных результатов расчетов или измерений ЭП ЛИ со значениями ПДУ. В соответствии с этим различают две формы ЛДОЗ:

– *расчетная (теоретическая) лазерная дозиметрия*, которая рассматривает методы расчетов ЭП ЛИ в зоне возможного воздействия ЛИ на человека и вычисления степени его опасности по результатам расчетов;

– *инструментальная лазерная дозиметрия*, рассматривающая методы и средства *дозиметрического контроля*, под которым понимается непосредственное измерение ЭП ЛИ в заданной точке пространства, и вычисления степени его опасности по результатам измерений.

Введем следующее понятие – *коэффициент степени опасности лазерного излучения* (КСОЛ) – коэффициент, показывающий степень превышения уровня энергетической экспозиции (облученности) от лазерного излучения элементарного участка поверхности, на котором расположена заданная точка пространства, над предельно допустимым уровнем энергетической экспозиции (облученности).

Чтобы вывести обобщенную формулу для вычисления КСОЛ, рассмотрим общую схему взаимодействия оптических полей излучения различных лазерных источников с отдельным участком поверхности тела человека (рисунок 2.1). Пусть задана некоторая точка пространства А, которую будем называть точкой контроля. При оценке СОЛ предполагаем, что эта точка находится на поверхности тела (на поверхности кожи или

роговой оболочки глаза). Свяжем с точкой (т.) А некоторый элементарный участок поверхности dS_A и единичный вектор \vec{n}_A , направленный по нормали к dS_A .

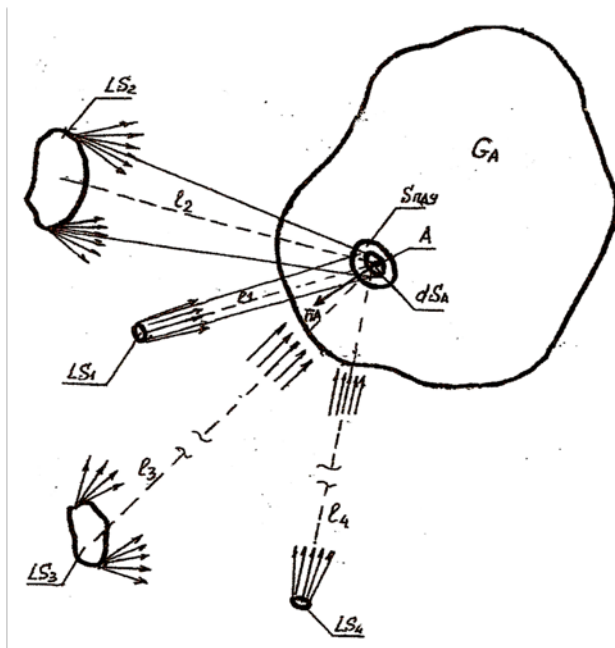


Рисунок 2.1 – Общая схема взаимодействия полей излучения различных лазерных источников с участком поверхности dS_A тела человека: $LS_1 - LS_4$ – источники лазерного излучения

В общем случае участок поверхности dS_A может облучаться лазерными источниками (Laser Sources, LS) следующих видов:

- источник лазерного излучения LS_1 , имеющий меньшие или сопоставимые размеры по сравнению с размерами небольшой области с площадью $S_{пду}$, на которой расположен элемент dS_A ; при этом источник LS_1 находится на незначительном расстоянии l_1 от т. А и излучает в небольшом телесном угле; элемент dS_A находится в слабо расходящемся поле излучения (такая модель характерна для случая, когда источником ЛИ является выходное окно лазерного изделия, близко расположенное к точке контроля А);

- источник LS_2 , имеющий примерно одинаковые или бóльшие размеры по сравнению с размерами области с площадью $S_{пду}$; источник LS_2 находится на незначительном расстоянии l_1 от т. А и излучает в сравнительно большом телесном угле; при этом на элемент dS_A попадает излучение от всех участков поверхности источника и можно считать, что dS_A находится в сходящемся поле излучения (такая модель характерна для случая, когда источником ЛИ является близко расположенное к т. А сравнительно большое по размерам пятно облучения на диффузно отражающей поверхности);

- источники LS_3, LS_4 , расстояния l_3, l_4 от которых до т. А значительно превышают размеры источника и площадки $S_{пду}$; источники могут излучать как в узком так и в широком телесных углах; из-за большой удаленности источников можно считать, что в любом случае площадка $S_{пду}$ и элемент dS_A находятся в пучке параллельных лучей, по которым распространяется ЛИ (эта модель характерна для источника любого вида, значительно удаленного от т. А, при этом источник ЛИ считается точечным).

Будем считать, что СОЛ оценивается за некоторое время контроля T_k . Поскольку точка А находится на живом объекте, предполагаем, что в каждый момент времени t_k на интервале T_k т. А может находиться в различных пространственных положениях,

перемещаясь в некоторой области пространства G_A из-за естественных движений тела человека (или отдельных частей тела). При этом изменяются взаимные положения направлений лучей, характеризующих распространение излучения источника, и вектора \vec{n}_A , а также изменяются расстояния $l_1 - l_4$.

Исходя из общепринятого в технике безопасности *принципа учета наилучшего действия воздействующего фактора (принципа учета наибольшего риска)*, запишем общее выражение для коэффициента степени опасности лазерного излучения $R_{\text{СОЛ}}$ в следующем виде

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{G_A} \{ [S_{\text{ПДУ}}^{-1} \iint_{S_{\text{ПДУ}}} H_A(X_A, Y_A, Z_A, T_K) dS] H_{\text{ПДУ}}^{-1}(t_B, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) \}, \quad (2.1)$$

где $H_A(X_A, Y_A, Z_A, T_K)$ (Дж·м⁻²) – энергетическая экспозиция элемента dS_A , окружающего точку контроля А с пространственными координатами X_A, Y_A, Z_A , определенная за время контроля T_K (начало системы координат $X Y Z$, не показанной на рисунке 2.1, будем связывать с центром источника лазерного излучения LS);

$H_{\text{ПДУ}}(t_B, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$ (Дж·м⁻²) – значение ПДУ энергетической экспозиции, зависящее от времени воздействия излучения t_B (с), длины волны излучения λ (нм) и углового размера источника излучения α_{LS} (рад) по отношению к точке контроля;

$S_{\text{ПДУ}}$ (м²) – площадь участка поверхности тела человека, значение которой регламентировано в СГ НД, устанавливающих значения ПДУ (в соответствии с СН 5804 [17] $S_{\text{ПДУ}} = 0,385 \text{ см}^2 = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ для роговицы глаза в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм; $S_{\text{ПДУ}} = 0,01 \text{ см}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$ для кожи и роговицы глаза в спектральных интервалах (СПИ) 180 – 380 нм и 1400 – 10⁵ нм);

$\max_{G_A} \{ \quad \}$ – обозначает необходимость определения максимального значения параметра, приведенного в скобках, по всей области G_A вероятного расположения т. А.

Параметр $H_A(X_A, Y_A, Z_A, T_K)$ представляет собой по сути *дозу лазерного излучения, попавшего на элемент dS_A за все время контроля T_K* . Именно доза падающего излучения наиболее объективно характеризует степень биологического воздействия ЛИ.

В соответствии с СН энергетические параметры лазерного излучения нормируются для различных временных интервалов в зависимости от режима его генерации. Так, например, для ИМ ЛИ и для ИМП ЛИ с частотой повторения импульсов менее 0,005 Гц и длительностью воздействия менее 1 с в СПИ 380 – 1400 нм (см. таблицу Г.1) нормируется ПДУ энергии импульса лазерного излучения $W_{\text{и ПДУ}}(\tau_{\text{и}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$ (Дж) длительностью $\tau_{\text{и}}$, прошедшего через круглое отверстие диаметром 7 мм. Это значение легко преобразуется в

ПДУ энергетической экспозиции для импульса излучения $H_{\text{И ПДУ}}(\tau_{\text{И}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$ ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$) по формуле $H_{\text{И ПДУ}}(\tau_{\text{И}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) = W_{\text{И ПДУ}}(\tau_{\text{И}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) / S_{\text{ПДУ}}$, где $S_{\text{ПДУ}} = S_{\text{ЗР}} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Для НЕПР ЛИ и ИМ ЛИ с частотой повторения импульсов более 0,005 Гц и длительностью воздействия более 1 с в СПИ 380 – 1400 нм (см. таблицу Г.2) нормируется ПДУ средней мощности излучения $P_{\text{ПДУ}}(t_{\text{В}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$ (Вт), прошедшего через апертуру диаметром 7 мм. Это значение преобразуется в ПДУ облученности $E_{\text{ПДУ}}(t_{\text{В}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$ ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) по формуле $E_{\text{ПДУ}}(t_{\text{В}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) = P_{\text{ПДУ}}(t_{\text{В}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) / S_{\text{ПДУ}}$.

Таким образом, для указанных выше случаев нормирования ПДУ общая формула (2.1) может использоваться в следующих видах:

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ \max_{\text{ГА}} \{ [W_{\text{ИА}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, \tau_{\text{И}}, t_{\text{К}})] W_{\text{И ПДУ}}^{-1}(\tau_{\text{И}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) \} \}, \quad (2.2)$$

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ \max_{\text{ГА}} \{ [S_{\text{ПДУ}}^{-1} \iint_{S_{\text{ПДУ}}} H_{\text{ИА}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, \tau_{\text{И}}, t_{\text{К}}) dS] H_{\text{И ПДУ}}^{-1}(\tau_{\text{И}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) \} \}, \quad (2.3)$$

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ \max_{\text{ГА}} \{ [P_{\text{А}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, t_{\text{К}})] P_{\text{ПДУ}}^{-1}(t_{\text{В}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) \} \}, \quad (2.4)$$

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ \max_{\text{ГА}} \{ [S_{\text{ПДУ}}^{-1} \iint_{S_{\text{ПДУ}}} E_{\text{А}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, t_{\text{К}}) dS] E_{\text{ПДУ}}^{-1}(t_{\text{В}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}}) \} \}, \quad (2.5)$$

где $W_{\text{ИА}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, \tau_{\text{И}}, t_{\text{К}})$ (Дж) – энергия импульса лазерного излучения длительностью $\tau_{\text{И}}$, прошедшего через круглое отверстие (апертуру) диаметром 7 мм с центром в точке контроля А в момент времени контроля $t_{\text{К}}$;

$H_{\text{ИА}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, \tau_{\text{И}}, t_{\text{К}})$ ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$) – энергетическая экспозиция от лазерного излучения элемента поверхности $dS_{\text{А}}$, окружающего точку контроля А, за время импульса излучения $\tau_{\text{И}}$ (импульсная энергетическая экспозиция) в момент времени контроля $t_{\text{К}}$;

$P_{\text{А}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, t_{\text{К}})$ (Вт) – мощность лазерного излучения, прошедшего через апертуру диаметром 7 мм с центром в точке контроля А в момент времени контроля $t_{\text{К}}$;

$E_{\text{А}}(X_{\text{А}}, Y_{\text{А}}, Z_{\text{А}}, t_{\text{К}})$ ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) – облученность от лазерного излучения элемента поверхности $dS_{\text{А}}$, окружающего точку контроля А, в момент времени контроля $t_{\text{К}}$;

$\max_{\text{ТК}} \{ \}$ – обозначает необходимость определения максимального значения параметра, приведенного в скобках, за общее время контроля $T_{\text{К}}$.

Используя введенное выше понятие «коэффициент степени опасности лазерного излучения», можно проводить специальную оценку условий труда (СОУТ) персонала в условиях воздействия ЛИ в соответствии с «Методикой проведения специальной оценки условий труда», утв. приказом Минтруда России от 24.01.2014 г. № 33н [29] («Методика СОУТ»). Для целей СОУТ в условиях воздействия ЛИ будем использовать таблицу 2.1, построенную на основе критериев разграничения классов (подклассов) условий труда,

приведенных в Приложении № 18 [29], и категорий профессионального риска, приведенных в Приложении 1 из руководства Р 2.2.1776 – 03 [84].

Т а б л и ц а 2.1 – Максимальные значения КСОЛ на РМ для различных классов (подклассов) условий труда при воздействии лазерного излучения

Класс (подкласс) условий труда ¹	Уровни ЛИ ¹	$R_{\text{СОЛ од max}}$	$R_{\text{СОЛ хр max}}$	Категория профессионального риска (ПР) ²	Срочность мероприятий по снижению риска ²
Допустимый – 2	$\leq \text{ПДУ}_{\text{хр}}$ $\leq \text{ПДУ}_{\text{од}}$	$< 1,0$	$< 1,0$	Пренебрежимо малый (переносимый) риск	Меры не требуются, но уязвимые лица нуждаются в дополнительной защите
Вредный – 3.1	$> \text{ПДУ}_{\text{хр}}$ $\leq \text{ПДУ}_{\text{од}}$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ < 10	Малый (умеренный)	Требуется меры по снижению риска
Вредный – 3.2	$> \text{ПДУ}_{\text{од}}$ $\leq 10 \text{ ПДУ}_{\text{од}}$	$\geq 1,0$ < 10	–	Средний (существенный)	Требуется меры по снижению риска в установленные сроки
Вредный – 3.3	$< 10^2 \text{ ПДУ}_{\text{од}}$	≥ 10 $< 10^2$	–	Высокий (непереносимый) риск	Требуется неотложные меры по снижению риска в установленные сроки
Вредный – 3.4	$< 10^3 \text{ ПДУ}_{\text{од}}$	$\geq 10^2$ $< 10^3$	–	Очень высокий (непереносимый) риск	Работы нельзя начинать или продолжать до снижения риска
Опасный – 4	$> 10^3 \text{ ПДУ}_{\text{од}}$	$\geq 10^3$	–	Сверхвысокий риск и риск для жизни, присущий данной профессии	Работы должны проводиться только по специальным регламентам

¹ Определения классов и критерии разграничения классов (подклассов) условий труда (уровни ЛИ в единицах ПДУ) даны по Приложению № 18 к «Методике СОУТ» [29].
² Определения категорий ПР и срочности мероприятий по снижению ПР даны по Р 2.2.1776 [84].
 П р и м е ч а н и е – Для подклассов 3.2 – 3.4 и класса 4 по [29] установлены требования только по однократному действию ЛИ.

В таблице 2.1 в качестве критериев разграничения классов (подклассов) условий труда используются максимальные значения КСОЛ на рабочем месте (РМ) для однократного воздействия ЛИ $R_{\text{СОЛ од max}}$ и для хронического воздействия ЛИ $R_{\text{СОЛ хр max}}$:

$R_{\text{СОЛ од max}} = \max_{\text{РМ}} \{R_{\text{СОЛ}}(X_A, Y_A, Z_A, T_k, \text{ПДУ}_{\text{од}})\}$ – максимальное значение КСОЛ на РМ, определенное для различных точек контроля А по формулам (2.2) – (2.5) с использованием параметров: $H_{\text{и пду}}(\tau_{\text{и}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, $W_{\text{и пду}}(\tau_{\text{и}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, $E_{\text{пду}}(t_{\text{в}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, $P_{\text{пду}}(t_{\text{в}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, определенных по СН 5804 – 91 для однократного действия ЛИ;

$R_{\text{СОЛ ХР max}} = \max_{\text{PM}} \{R_{\text{СОЛ}}(X_A, Y_A, Z_A, T_K, \text{ПДУ}_{\text{ХР}})\}$ – максимальное значение КСОЛ на РМ, определенное для различных точек контроля А по формулам (2.2) – (2.5) с использованием параметров: $H_{\text{и ПДУ ХР}}(\tau_{\text{и}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, $W_{\text{и ПДУ ХР}}(\tau_{\text{и}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, $E_{\text{ПДУ ХР}}(t_{\text{в}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, $R_{\text{ПДУ ХР}}(t_{\text{в}}, \lambda, \alpha_{\text{LS}})$, определенных по СН для хронического действия ЛИ.

Значения $R_{\text{СОЛ од max}}$, $R_{\text{СОЛ ХР max}}$ получают путем вычислений (измерений) энергетических параметров ЛИ в различных точках контроля в пределах РМ, вычислений КСОЛ для выбранных точек контроля, и выбором наибольших результатов вычислений или измерений.

В дальнейшем, рассматривая расчетные методы определения КСОЛ, будем использовать в основном энергетический параметр $H_A(X_A, Y_A, Z_A, t_K)$, применяя другие энергетические параметры в особо оговоренных случаях.

2.2 Расчет энергетической экспозиции в лазерном гауссовом пучке основной ТЕМ₀₀ моды

Далее в этой главе будут рассмотрены методы расчетной лазерной дозиметрии для оптических полей лазерных пучков идентичных полям от лазерных источников LS₁ и LS₄, показанных на рисунке 2.1. Рассмотрим случай определения КСОЛ, когда в область G_A вокруг точки контроля А попадает ЛИ, направленное через выходное окно резонатора лазера (рисунок 2.2). Привяжем к центру выходного окна источника лазерного излучения LS точку О начала прямоугольной системы координат XYZ, в которой ось Z направлена по нормали к плоскости выходного окна вдоль оси пучка лазерного излучения. Будем рассматривать область G_A со сферической поверхностью, которая в общем случае пересекает поле лазерного излучения. Для дальнейшего рассмотрения представляет интерес полусфера, обращенная к центру О лазерного источника LS, которую будем называть полусферой вероятного воздействия (ПВВ_A). Радиус ПВВ_A $r_{\text{ПВВ}}$ можно принять равным 20 см, если т. А привязана к участку поверхности лица человека и в т. А учитывается возможность поражения глаз. Радиус $r_{\text{ПВВ}}$ можно принять равным 50 см, если в т. А учитывается возможность поражения открытых участков кожи кистей рук.

Для резонатора лазера, составленного из сферических или сферического и плоского зеркал, распределение интенсивности лазерного излучения $I_{\text{pq}}(r, \varphi)$ в поперечном сечении пучка описывается формулой [37]

$$I_{\text{pq}}(r, \varphi) = \left(\sqrt{2} \frac{r}{\omega}\right)^{2q} \left[L_p^q \left(2 \frac{r^2}{\omega^2} \right) \right]^2 e^{-2 \frac{r^2}{\omega^2}} \cos^2(q\varphi), \quad (2.6)$$

где ω – радиус распределения, описываемого функцией Гаусса, определенный по уровню e^{-2} от максимального значения интенсивности;

L_p^q – полином Лаггера;

p, q – радиальный и угловой индексы моды;

r, φ – текущие полярные координаты в сечении пучка.

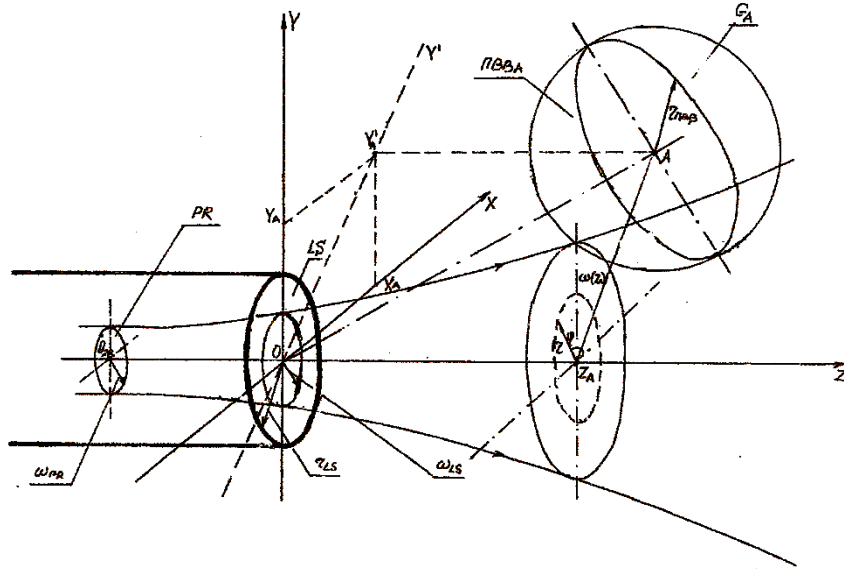


Рисунок 2.2 – Схема взаимного расположения выходного окна источника ЛИ, точки контроля А и полусферы вероятного воздействия в поле гауссова лазерного пучка: PR – перетяжка лазерного пучка, LS – выходное окно источника ЛИ, ПВВ_А – полусфера вероятного воздействия

Пучки ЛИ с распределением интенсивности, описываемым формулой (2.6), принято называть гауссовыми пучками. **Наиболее неблагоприятное с позиции ЛБ распределение интенсивности существует в гауссовом пучке основной TEM₀₀ моды** (в пучке с индексами моды $p = 0, q = 0$). Распределение интенсивности ЛИ в плоскости, расположенной на расстоянии Z_A от выходного окна лазера, описывается формулой

$$I(r, Z_A) = I_{\max}(Z_A) e^{-2 \frac{r^2}{\omega^2(Z_A)}}, \quad (2.7)$$

где $I_{\max}(Z_A)$ – максимальное значение интенсивности в точке с координатой Z_A на оси пучка;

$\omega(Z_A)$ – радиус пучка в точке с координатой Z_A , определенный по уровню e^{-2} от максимального значения интенсивности.

Переходя от обобщенного параметра «интенсивность» к рассматриваемому нами энергетическому параметру – энергетическая экспозиция $H(r, Z_A)$, запишем формулу распределения энергетической экспозиции в гауссовом пучке основной TEM₀₀ моды

$$H(r, Z_A) = H_{\max}(Z_A) e^{-2 \frac{r^2}{r_{\Pi}(Z_A)^2}}, \quad (2.8)$$

где $H_{\max}(Z_A)$ – максимальное значение энергетической экспозиции в плоскости, находящейся на расстоянии Z_A от т. О центра выходного окна лазерного источника LS;

r – расстояние от оси лазерного пучка до точки, в которой определяют значение энергетической экспозиции;

$r_{\Pi}(Z_A) = \omega(Z_A)$ – радиус гауссова пучка в плоскости, находящейся на расстоянии Z_A от выходного окна, определенный по уровню e^{-2} ; $r_{\Pi}(Z_A) = 0,5d_{\Pi}(Z_A)$, где $d_{\Pi}(Z_A)$ – диаметр лазерного гауссова пучка в рассматриваемой плоскости.

График функции относительного распределения энергетической экспозиции по сечению пучка $H_{\text{отн}}(r) = H(r, Z_A) / H_{\max}(Z_A)$ показан на рисунке 2.3 (позиция 1).

На рисунке 2.3 показаны также графики функций распределения $H_{\text{отн}}(r)$ в многомодовом гауссовом лазерном пучке (позиция 2) и в идеализированном пучке с равномерным распределением экспозиции (позиция 3). Мощность (энергия) ЛИ в лазерных пучках с видами распределений 1, 2 и 3 одинакова.

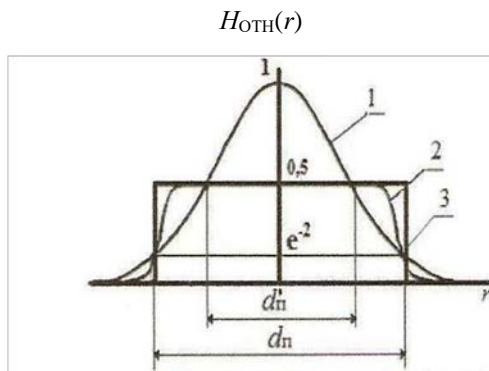


Рисунок 2.3 – Распределение относительной энергетической экспозиции по сечению гауссова пучка основной TEM_{00} моды: d_{Π} , d'_{Π} – диаметры пучка по уровням e^{-2} и 0,5

На рисунке 2.4 показана схема для решения задачи оценки СОЛ на плоскости, проходящей через ось симметрии пучка Z и точку контроля А. В этой плоскости выбрана прямоугольная система координат $Y'OZ$ (см. рисунок 2.2) с началом в точке О. В рассматриваемой схеме учтено, что *энергия излучения лазера распространяется в свободном пространстве по криволинейным лучам (гиперболам)*. Эти лучи совпадают с нормальными к волновому фронту, который вблизи оси представляет собой сферу.

Пучок имеет минимальное сечение (перетяжку) PR, в которой радиус пучка TEM_{00} моды ω_0 определяют по формуле [37]

$$\omega_0 = (\lambda R_{\text{э}} / 2\pi)^{1/2}, \quad (2.9)$$

где $R_{\text{э}}$ – конфокальный параметр (расстояние между зеркалами эквивалентного конфокального резонатора, поле излучения которого совпадает с полем излучения данного резонатора).

Радиус пучка $\omega(Z_A)$ в плоскости с координатой Z_A описывается формулой [37]

$$\omega(Z_A) = \omega_0 [1 + 4(l_0 + Z_A)^2 / R_{\text{э}}^2]^{1/2}, \quad (2.10)$$

где l_0 – расстояние от точки О начала координат до плоскости перетяжки.

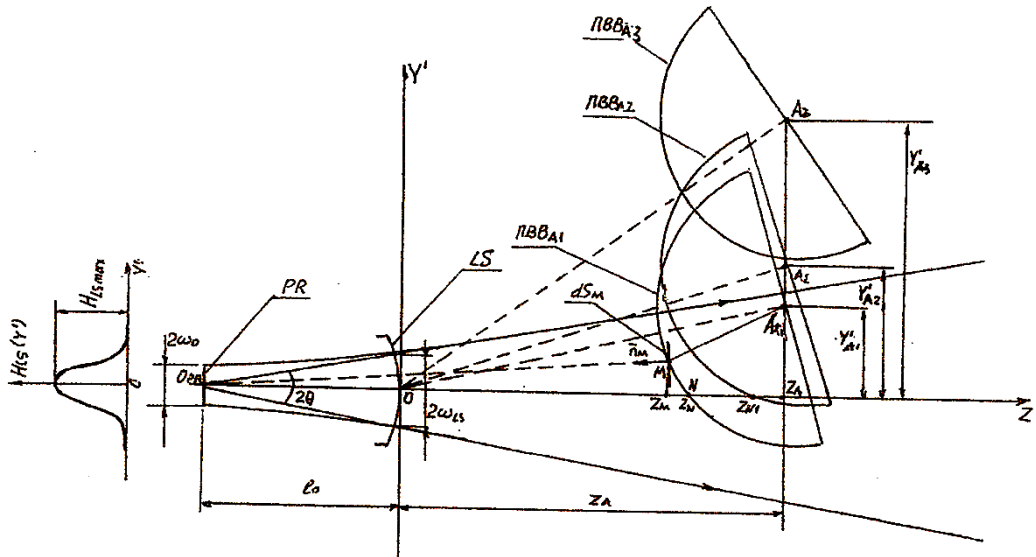


Рисунок 2.4 – Схема взаимного расположения выходного окна лазера, точек контроля $A_1 - A_3$ и полусфер вероятного воздействия в поле гауссова лазерного пучка: PR – перетяжка лазерного пучка, LS – выходное окно лазера, ПВВ $_{A1}$ – ПВВ $_{A3}$ – полусферы вероятного воздействия

На значительном удалении от перетяжки ($Z_A \gg R_0$) радиус пучка линейно возрастает, и пучок характеризуется постоянным углом расходимости Θ (рад), определенным по уровню e^{-2} от $H_{\max}(Z_A)$. Для пучка TEM $_{00}$ моды

$$\Theta = (2\lambda / \pi R_0)^{1/2} = \lambda / \pi \omega_0. \quad (2.11)$$

Положим $Z_A = 0$, тогда из формулы (2.10) с учетом формул (2.9) и (2.11) получаем

$$l_0 = \Theta^{-1}(\omega_{LS}^2 - \omega_0^2)^{1/2}, \quad (2.12)$$

где ω_{LS} – радиус пучка в плоскости выходного окна резонатора.

Выражая R_0 через Θ по формуле (2.11) и используя выражение (2.12), получаем

$$\omega(Z_A) = \{ \omega_0^2 + [\Theta Z_A + (\omega_{LS}^2 - \omega_0^2)^{1/2}]^2 \}^{1/2}, \quad (2.13)$$

где $\omega_0 = \lambda / \pi \Theta$ (параметры: λ , Θ , ω_{LS} определяют из паспортных данных ЛИЗ).

Выразим параметр $H_{\max}(Z_A)$ через энергию излучения в лазерном пучке W (Дж), которую можно определить из паспортных данных ЛИЗ. Рассматриваемые энергетические параметры связаны соотношением

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} H_{\max}(Z_A) e^{-2r^2/\omega^2(Z_A)} r dr d\varphi. \quad (2.14)$$

Из формулы (2.14) получаем

$$H_{\max}(Z_A) = (2W/\pi)\omega^{-2}(Z_A) = (2W/\pi)\{ \omega_0^2 + [Z_A \Theta + (\omega_{LS}^2 - \omega_0^2)^{1/2}]^2 \}^{-1} = K_W(Z_A)W, \quad (2.15)$$

$$\text{где } K_W(Z_A) (\text{м}^{-2}) = (2/\pi)\omega^{-2}(Z_A) = 0,64\{ \omega_0^2 + [Z_A \Theta + (\omega_{LS}^2 - \omega_0^2)^{1/2}]^2 \}^{-1}, \quad (2.16)$$

$K_W(Z_A)$ – коэффициент пересчета для определения максимальной энергетической экспозиции в точке контроля на оси лазерного пучка, через энергию пучка W .

Формулу (2.15) можно упростить при больших расстояниях Z_A , используя одну из двух приближенных моделей поля лазерного пучка, которые применяются в некоторых публикациях по лазерной безопасности, например, в работах [67, 85]. В соответствии с этими моделями *энергия лазерного излучения распространяется в свободном пространстве по прямолинейным лучам*, в отличие от гиперболических лучей, принимавшихся выше в расчет по точной модели поля. В первой модели [67] считается, что пучок излучения имеет вид усеченного конуса, имеющего в вершине круглую плоскую поверхность с радиусом ω_{LS} . Во второй модели [85] считается, что пучок имеет вид полного конуса с вершиной в центре выходного окна лазерного излучателя. Для этих моделей используются два приближенных выражения для радиусов лазерных пучков, которые обозначим как $\omega_{PP1}(Z_A)$ и $\omega_{PP2}(Z_A)$. Для модели, используемой в [67], имеем

$$\omega_{PP1}(Z_A) = \omega_{LS} + Z_A \Theta. \quad (2.17)$$

Для модели, используемой в [86], имеем

$$\omega_{PP2}(Z_A) = Z_A \Theta. \quad (2.18)$$

Формула (2.15) для приближенных моделей пучка принимает вид

$$H_{\max}(Z_A) = K_{WPP1}(Z_A) W, \text{ где } K_{WPP1} = 0,64(\omega_{LS} + Z_A \Theta)^{-2} \quad (2.19)$$

по модели усеченного конуса;

$$H_{\max}(Z_A) = K_{WPP2}(Z_A) W, \text{ где } K_{WPP2}(Z_A) = 0,64(Z_A \Theta)^{-2} \quad (2.20)$$

по модели полного конуса.

2.3 Расчет энергетической экспозиции сетчатки глаза при облучении зрачка лазерным гауссовым пучком основной TEM₀₀ моды

Далее будем предполагать, что в точке А в области пространства G_A располагается центр зрачка глаза человека – органа, наиболее подверженного неблагоприятному воздействию ЛИ, а длина волны ЛИ лежит в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм. В этом спектральном диапазоне ЛИ достигает сетчатки, и, благодаря фокусирующим свойствам оптической системы глаза, создает на ее поверхности уровни энергетической экспозиции, значительно превышающие ее уровни в плоскости зрачка (см. § 1.1). Впервые вопросы оценки СОЛ для глаз в полях лазерных пучков были рассмотрены соискателем в статье «Оценка степени опасности направленных лазерных пучков для глаз человека» (Кибовский В. Т., Кухтевич В. И., Новицкий Л. А., «Квантовая электроника», 1980, т. 7, №12 [86]).

Общая схема взаимодействия поля излучения лазерного пучка с глазом приведена на рисунке 2.5. В предлагаемой схеме центр О системы координат XYZ совпадает с центром

перетяжки гауссова пучка. С точкой контроля A будем связывать область G_A со сферической поверхностью, которую назовем сферой вероятного воздействия $СВВ_A$. Заметим, что в рассматриваемом случае при оценке СОЛ следует принимать в расчет именно сферу в отличие от полусферы, используемой в модели взаимодействия, рассмотренной в § 2.2.

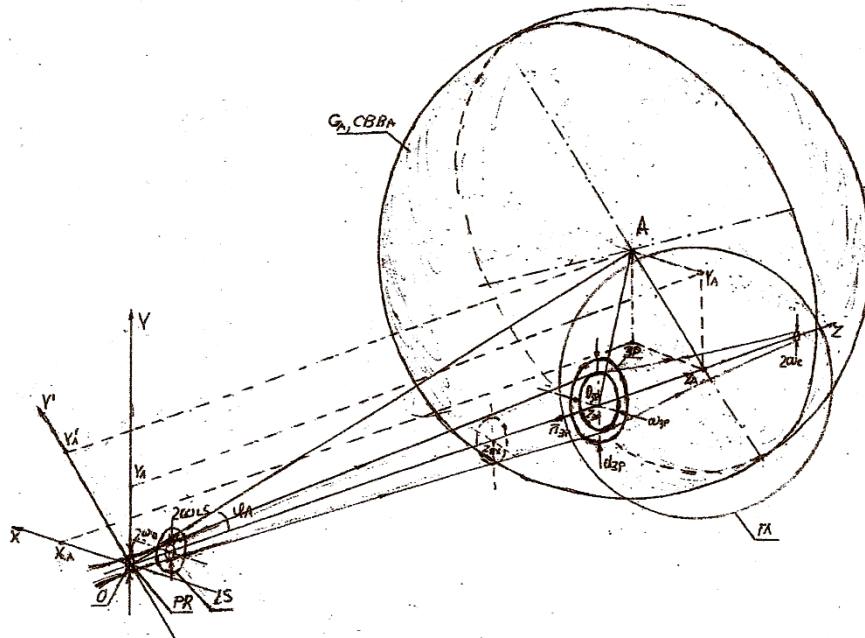


Рисунок 2.5 – Схема взаимного расположения выходного окна источника ЛИ, точки контроля A , сферы вероятного воздействия и зрачка глаза в поле гауссового лазерного пучка; PR – перетяжка лазерного пучка, LS – выходное окно лазерного источника, ЗР – зрачок глаза, ГЛ – глазное яблоко, $СВВ_A$ – сфера вероятного воздействия

Это объясняется тем, что благодаря специфике взаимодействия поля гауссова пучка с ОС глаза, точки, которые следует учитывать при расчетах КСОЛ как точки наибольшей опасности, могут находиться как на передней поверхности $СВВ_A$, так и внутри ее или даже на ее задней поверхности. На рисунке 2.5 показан случай наиболее опасного воздействия лазерного пучка на глаз, когда пучок целиком попадает во входной зрачок, ось пучка проходит через центр зрачка $O_{ЗР}$, а нормаль к плоскости зрачка $\vec{n}_{ЗР}$ совпадает с осью пучка. Именно этот наиболее опасный случай мы будем рассматривать далее.

На рисунке 2.6 показана схема облучения зрачка глаза гауссовым лазерным пучком, направленным по оси визирования, выполненная в плоскости, проходящей через точку A и ось пучка. Система координат $Y' O Z$ (см. рисунок 2.5) выбрана так, что ось Z совпадает с осью лазерного пучка, а ось Y' параллельна линии AZ_A , соединяющей точку A с точкой Z_A проекции точки A на ось Z . Решим задачу определения максимальной энергетической экспозиции сетчатки глаза $H_{Сmax}(Z_{ЗР})$ через энергию лазерного пучка.

Упрощенная оптическая система глаза [87] представляет собой положительную линзу (хрусталик), за которой находится вещество с показателем преломления $n' = 1,336$

(стекловидное тело). Для упрощения считаем, что передняя и задняя главные плоскости глаза совмещены с плоскостью зрачка AA' .

Расстояние от главной плоскости глаза до сетчатки равно заднему фокусному расстоянию глаза в покое аккомодации (аккомодация на бесконечность) $f'_{ГЛ} = 22,365$ мм. При аккомодации глаза на некоторую плоскость BB' , расположенную на расстоянии $l_{ак}$ от зрачка, задний фокус F' глаза находится перед сетчаткой на расстоянии f' от плоскости AA' . Численные значения $f'_{ГЛ}$ и n' взяты из данных для схематического нормального глаза по А. Гульстранду [87].

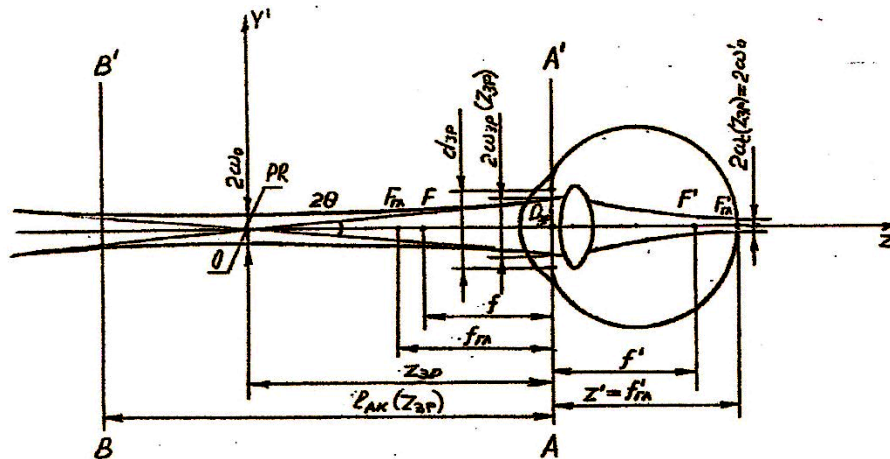


Рисунок 2.6 – Схема облучения зрачка глаза гауссовым лазерным пучком для наиболее неблагоприятного случая его аккомодации

В работе [86] автором выведена формула, описывающая распределение интенсивности в пятне облучения на сетчатке глаза при попадании в его зрачок гауссова пучка основной TEM_{00} моды. При выводе формулы учитывалась как дифракция гауссова пучка основной моды на круглом отверстии, так и абберационное размытие изображения. Кроме того использовался метод вычисления радиуса гауссова пучка, преобразованного оптической системой [37], для ближней зоны расстояний $Z_{ЗР}$, когда пучок ЛЛИ полностью попадает в зрачок глаза.

Для ближней зоны считается, что $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) > 2,2$, где $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) = r_{ЗР}/\omega_{ЗР}(Z_{ЗР})$ ($r_{ЗР}$ – радиус зрачка; $\omega_{ЗР}(Z_{ЗР})$ – радиус гауссова пучка в плоскости зрачка). В этой зоне за хрусталиком формируется новый гауссов пучок, который характеризуется конфокальным параметром $R'_э$ и имеет новую перетяжку ω'_0 , находящуюся на некотором расстоянии Z' от плоскости зрачка. С учетом известной формулы для определения $R'_э$ [37] в работе [86] получены формулы для вычисления ω'_0 и Z' . В [86] было принято, что **наихудшие последствия облучения глаза лазерным пучком возникают, когда перетяжка преобразованного пучка попадает на сетчатку глаза**. При этом глаз аккомодируется на некоторую плоскость BB'

(рисунок 2.6), находящуюся не на «бесконечности», а на некотором расстоянии $l_{AK}(Z_{ЗР})$ от плоскости зрачка, которое назовем *расстоянием наилучшей аккомодации*.

С учетом принятого условия $Z' = f'_{ГЛ}$ получено следующее уравнение

$$x^2[p(Z_{ЗР}) - 1] + x[p^2(Z_{ЗР}) + q^2(Z_{ЗР}) - 2p(Z_{ЗР})] - [p^2(Z_{ЗР}) + q^2(Z_{ЗР})] = 0, \quad (2.21)$$

где $x = f' / f'_{ГЛ}$; $q = n' R_{Э} / 2 f'_{ГЛ}$; $p = n' Z_{ЗР} / f'_{ГЛ}$.

Решая уравнение (2.21) для любого $Z_{ЗР}$, определяем значения f' и $l_{AK} = f'_{ГЛ} x / (x - 1)$.

С целью получения общего выражения для радиуса пятна облучения на сетчатке глаза $\omega_C(Z_{ЗР})$ автором приняты следующие условия. Без учета aberrаций при $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) < 2,2$ пятно облучения начинает «размываться» за счет дифракции, и при $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) \leq 0,2$ его размер полностью определяется дифракцией на зрачке. Предположим, что при $0,2 < \alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) < 2,2$ радиус пятна на сетчатке $\omega_{СД}(Z_{ЗР})$ (радиус дифракционной составляющей) изменяется линейно: $\omega_{СД}(Z_{ЗР}) = 0,25[3,4 + \alpha_{ЗР}(Z_{ЗР})\beta_{ЗР}(Z_{ЗР})]\lambda f'_{ГЛ} / n' 2r_{ЗР}$. Эта формула получена из условий: $\omega_{СД}(Z_{ЗР}) = \omega'_0$ при $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) = 2,2$, и $\omega_{СД}(Z_{ЗР}) = 0,9\lambda f'_{ГЛ} / n' 2r_{ЗР}$ при $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) = 0,2$. Вторая формула следует из условия равенства энергии излучения в распределении Эйри [88] и в эквивалентном ему распределении Гаусса.

Коэффициент $\beta_{ЗР}(Z_{ЗР})$ вычисляют по формуле

$$\beta_{ЗР}(Z_{ЗР}) = f' f'_{ГЛ}^{-1} \{ [q^2(Z_{ЗР}) + p^2(Z_{ЗР})][q^2(Z_{ЗР}) + (p(Z_{ЗР}) - 1)^2 f' f'_{ГЛ}^{-1}] \}^{1/2}. \quad (2.22)$$

Для нахождения aberrационной составляющей используем значения коэффициента Штреля $\xi(Z_{ЗР})$, приведенные в работе [88] для различных диаметров зрачка. Примем, что коэффициент Штреля равен отношению максимума энергетической экспозиции сетчатки в оптической системе с aberrациями к максимуму гауссова распределения экспозиции без учета aberrаций. Из условия равенства энергий в обоих распределениях получена следующая формула для вычисления aberrационной составляющей радиуса пятна засветки $\omega_{С\text{АБ}}(Z_{ЗР}) = 0,9\lambda [\xi^{-1}(Z_{ЗР}) - 1]^{1/2} f'_{ГЛ} / (n' 2r_{ЗР})$.

Используем следующее выражение для вычисления общего радиуса пятна облучения на сетчатке глаза

$$\omega_C(Z_{ЗР}) = \sqrt{\omega_{СД}^2(Z_{ЗР}) + \omega_{С\text{АБ}}^2(Z_{ЗР})}. \quad (2.23)$$

Считаем, что распределение энергетической экспозиции сетчатки имеет следующий вид

$$H_C(r, Z_{ЗР}) = H_{C\text{max}}(Z_{ЗР}) e^{\frac{-2r^2}{\omega_C^2(Z_{ЗР})}}, \quad (2.24)$$

где $\omega_C(Z_{ЗР}) = \lambda f'_{ГЛ} (n' 2r_{ЗР})^{-1} \{ \gamma^2(Z_{ЗР}) + 0,81[\xi^{-1}(Z_{ЗР}) - 1] \}^{1/2}$; (2.25)

$$\begin{aligned} \gamma(Z_{3P}) &= 0,64\alpha_{3P}(Z_{3P})\beta_{3P}(Z_{3P}) && \text{при } \alpha_{3P}(Z_{3P}) \geq 2,2; \\ \gamma(Z_{3P}) &= 0,25[3,4 + \alpha_{3P}(Z_{3P})\beta_{3P}(Z_{3P})] && \text{при } 0,2 < \alpha_{3P}(Z_{3P}) < 2,2; \\ \gamma(Z_{3P}) &= 0,9 && \text{при } \alpha_{3P}(Z_{3P}) \leq 0,2. \end{aligned}$$

Графики функции $\omega_c(Z_{3P})$ приведены на рисунке 2.7 для зрачка диаметром $d_{3P} = 7\text{мм}$ (наихудший случай ночного зрения) для лазерного пучка с параметрами: $\lambda = 10^{-6}\text{м}$; $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}$ рад.

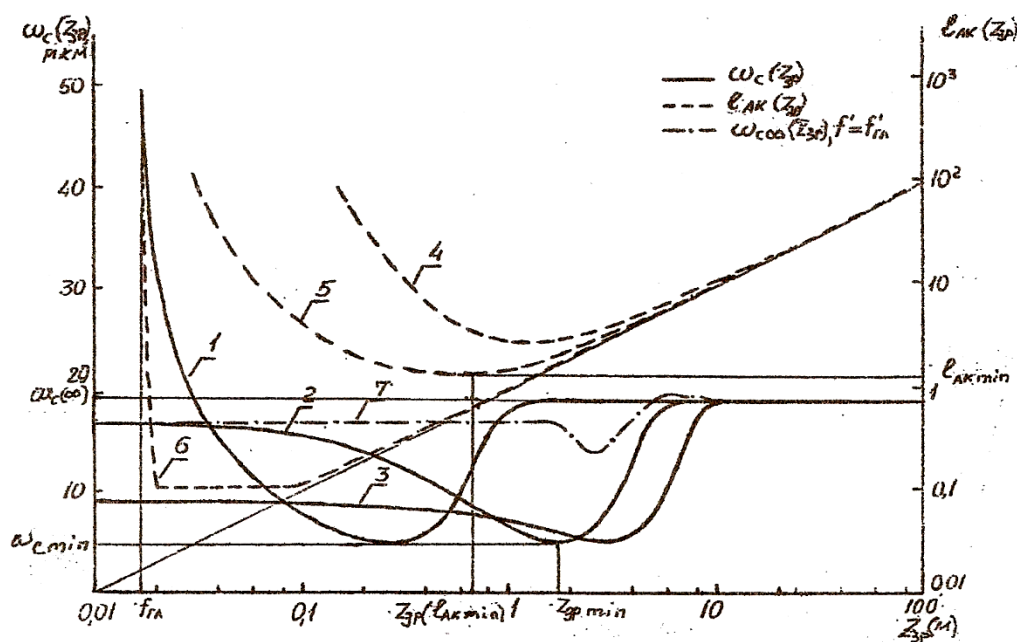


Рисунок 2.7 – Графики зависимости радиуса пятна облучения на сетчатке глаза $\omega_c(Z_{3P})$ и расстояния наилучшей аккомодации $l_{AK}(Z_{3P})$ от расстояния Z_{3P} , построенные для $\lambda = 10^{-6}$ м, $d_{3P} = 7\text{мм}$: 3, 4 – графики для $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад; 2, 5, 7 – $\Theta = 10^{-3}$ рад; 1, 6 – $\Theta = 5 \cdot 10^{-3}$ рад

При расчетах коэффициент Штреля определялся по данным работы [88], причем для $\alpha_{3P}(Z_{3P}) > 1$ за диаметр зрачка принималось значение $2\omega_{3P}(Z_{3P})$. Из графиков видно, что при удалении плоскости зрачка глаза от перетяжки пучка, радиус пятна облучения на сетчатке в условиях наилучшей аккомодации уменьшается от значения $\omega_c(Z_{3P} \rightarrow 0) = \Theta f'_{GL} / n'$ до некоторого минимального значения $\omega_{c \min} \approx 5$ мкм, что соответствует **минимальному диаметру пятна облучения на сетчатке $d_{c \min} \approx 10$ мкм.**

Этому значению соответствует расстояние $Z_{3P \min}$. При дальнейшем удалении радиус $\omega_c(Z_{3P})$ начинает возрастать за счет дифракционного и абберационного расширения пятна облучения на сетчатке и достигает значения

$$\omega_c(\infty) = 4,5 \lambda f'_{GL} / (n' r_{3P}), \quad (2.26)$$

которое практически полностью определяется абберациями глаза. Это значение остается постоянным при дальнейшем удалении зрачка глаза от перетяжки.

На рисунке 2.7 приведены также графики зависимости расстояния наилучшей аккомодации $l_{AK}(Z_{ЗР})$ от расстояния $Z_{ЗР}$. Из графиков видно, что для каждого значения Θ имеется некоторое наименьшее значение $l_{AK \min}$, которое уменьшается с увеличением Θ . Однако, $l_{AK \min}$ не может быть меньше расстояния до ближней точки глаза (≈ 125 мм) [87]. Этим объясняется наличие горизонтального участка на графике для $\Theta = 5 \cdot 10^{-3}$ рад. Слева от точки $Z_{ЗР}(l_{AK \min})$ функция $l_{AK}(Z_{ЗР})$ резко стремится к бесконечности; справа от этой точки она стремится к $Z_{ЗР}$, причем при расстояниях $Z_{ЗР} > Z_{ЗР \min}$, функция $l_{AK}(Z_{ЗР})$ практически совпадает с $Z_{ЗР}$. Это означает, что **наихудшие условия аккомодации – это аккомодация на плоскость, лежащую вблизи перетяжки лазерного пучка.**

Описанные выше условия фокусировки лазерного пучка на сетчатку при учете наилучшей аккомодации принято называть «острой фокусировкой» пучка. Значение диаметра пятна облучения на сетчатке $d_{C \min} \approx 10$ мкм в случае острой фокусировки было получено и опубликовано в период 80-х годов еще несколькими авторами независимо друг от друга с применением различных методик вычислений [89, 90]. **Результаты этих вычислений в совокупности с результатами, опубликованными соискателем [86], были учтены при разработке ПДУ лазерного излучения [20], действующими до настоящего времени в соответствии с СН 5804 – 91 [17] и СанПин 2.2.4.3359 – 16 [18].**

Выразим максимальное значение энергетической экспозиции сетчатки глаза $H_{C \max}(Z_{ЗР})$ через энергию лазерного пучка W . Энергию, прошедшую через зрачок глаза $W_{ЗР}(Z_{ЗР})$, можно вычислить по формуле

$$W_{ЗР}(Z_{ЗР}) = W [1 - e^{-2\alpha_{ЗР}^2(Z_{ЗР})}]. \quad (2.27)$$

Энергия излучения, падающего на сетчатку глаза, $W_C(Z_{ЗР}) = \tau_{ГЛ}(\lambda)W_{ЗР}(Z_{ЗР})$ связана с распределением энергетической экспозиции сетчатки (2.24) выражением

$$W_C(Z_{ЗР}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} H_C(r, Z_{ЗР}) r dr d\varphi, \quad (2.28)$$

где $\tau_{ГЛ}(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптических сред глаза на длине волны λ .

Из результата интегрирования по формуле (2.28) с учетом (2.27) получаем

$$H_{C \max}(Z_{ЗР}) = [2\tau_{ГЛ}(\lambda)W_{ЗР}(Z_{ЗР})/\pi] \omega_C^{-2}(Z_{ЗР}) = [2\tau_{ГЛ}(\lambda)W/\pi \omega_C^2(Z_{ЗР})] \times \\ \times [1 - e^{-2\alpha_{ЗР}^2(Z_{ЗР})}] = K_W(Z_{ЗР})W, \quad (2.29)$$

где $K_W(Z_{ЗР})$ (M^2) – коэффициент пересчета для определения $H_{C \max}(Z_{ЗР})$ через энергию лазерного пучка, который вычисляют по формуле

$$K_W(Z_{3P}) = [2\tau_{ГЛ}(\lambda)/\pi \omega_C^2(Z_{3P})] [1 - e^{-2\alpha_{3P}^2(Z_{3P})}]. \quad (2.30)$$

Графики зависимости $K_W(Z_{3P})$, построенные для лазерных пучков с параметрами: $\lambda = 10^{-6}$ м, $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$, 10^{-3} , $5 \cdot 10^{-3}$ рад при $d_{3P} = 7$ мм, приведены на рисунке 2.8.

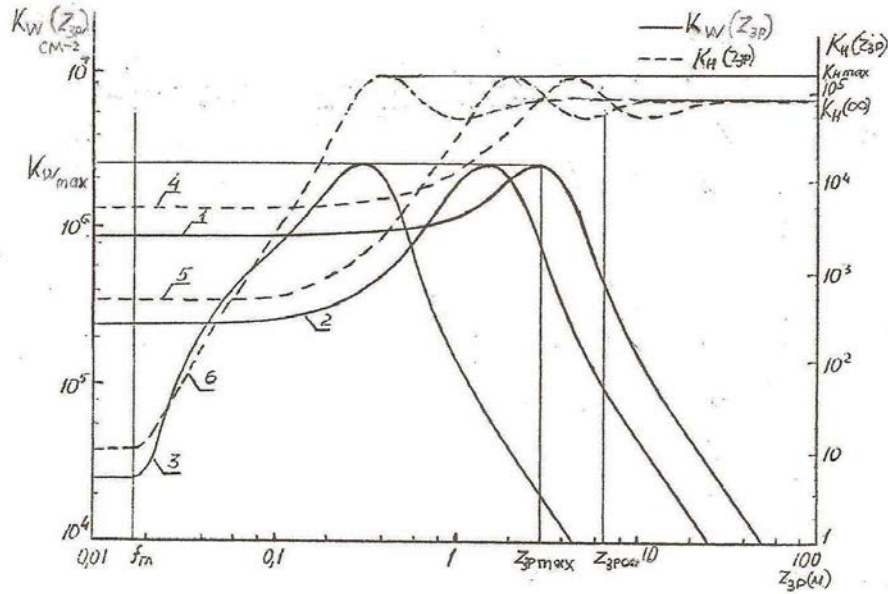


Рисунок 2.8 – Графики зависимости коэффициентов пересчета для определения максимальной энергетической экспозиции сетчатки глаза через энергию лазерного пучка $K_W(Z_{3P})$ (1, 2, 3) и максимальное значение энергетической экспозиции плоскости зрачка $K_H(Z_{3P})$ (4, 5, 6) от расстояния Z_{3P} , построенные для $\lambda = 10^{-6}$ м, $d_{3P} = 7$ мм: 1, 4 – графики для $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад; 2, 5 – для $\Theta = 10^{-3}$ рад; 3, 6 – для $\Theta = 5 \cdot 10^{-3}$ рад

Из графиков видно, что при удалении глаза от перетяжки максимальная энергетическая экспозиция сетчатки сначала возрастает, достигая в некоторой точке с координатой $Z_{3P \max}$ максимального значения

$$H_{C \max}(Z_{3P \max}) = WK_{W \max}, \quad (2.31)$$

после чего начинает убывать так, что чем больше расстояние Z_{3P} , тем ближе закон убывания к функции $1/Z_{3P}^2$. Точка $Z_{3P \max}$ на рисунке 2.8 совпадает с точкой $Z_{3P \min}$ на рисунке 2.7, соответствующей минимальному радиусу пятна засветки на сетчатке $\omega_{C \min}$.

Выразим $H_{C \max}(Z_{3P})$ через максимальное значение энергетической экспозиции плоскости зрачка $H_{3P \max}(Z_{3P})$, для чего подставим в (2.29) $W = 0,5 H_{3P \max}(Z_{3P})\pi \omega_{3P}^2(Z_{3P})$.

$$H_{C \max}(Z_{3P}) = \tau_{ГЛ}(\lambda) H_{3P \max}(Z_{3P}) r_{3P}^2 [1 - e^{-2\alpha_{3P}^2(Z_{3P})}] \alpha_{3P}^{-2}(Z_{3P}) \omega_C^{-2}(Z_{3P}) = K_H(Z_{3P}) H_{3P \max}, \quad (2.32)$$

$$\text{где } K_H(Z_{3P}) = \tau_{ГЛ}(\lambda) r_{3P}^2 [1 - e^{-2\alpha_{3P}^2(Z_{3P})}] \alpha_{3P}^{-2}(Z_{3P}) \omega_C^{-2}(Z_{3P}), \quad (2.33)$$

$K_H(Z_{3P})$ – коэффициент пересчета для определения $H_{C \max}(Z_{3P})$ через $H_{3P \max}(Z_{3P})$.

Графики зависимости $K_H(Z_{ЗР})$ от расстояния $Z_{ЗР}$, построенные для лазерных пучков с параметрами: $\lambda = 10^{-6}$ м, $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}$ рад при $d_{ЗР} = 7$ мм, приведены на рисунке 2.8. Из графиков видно, что при больших расстояниях $Z_{ЗР}$ коэффициент $K_H(Z_{ЗР})$ принимает постоянное значение $K_H(\infty)$, поскольку значение $\omega_C(Z_{ЗР})$ при увеличении $Z_{ЗР}$ становится постоянным. Определим расстояние Z_∞ , начиная с которого можно с заданной погрешностью приближения $\delta_{H\infty}$ считать, что $K_H(Z_{ЗР}) = K_H(\infty)$. Из формулы (2.33) при условии $\alpha_{ЗР}(Z_{ЗР}) \leq 0,2$ для $\delta_{H\infty} = 4\%$ получаем

$$Z_\infty = \Theta^{-1} [r_{ЗР}^2 / \alpha_{ЗР}^2(Z_\infty) - \omega_0^2]^{1/2} = 5r_{ЗР} \Theta^{-1}. \quad (2.34)$$

Для значений $Z_{ЗР} \geq Z_\infty$ имеем

$$K_H(Z_{ЗР}) = K_H(\infty) = \tau_{ГЛ}(\lambda) 2 r_{ЗР}^2 \omega_C^{-2}(\infty). \quad (2.35)$$

Подставляя в эту формулу выражение (2.26), получаем

$$K_H(\infty) = 9,88 \cdot 10^{-2} \tau_{ГЛ}(\lambda) [r_{ЗР}^2 n' / (\lambda f'_{ГЛ})]^2. \quad (2.36)$$

Для $r_{ЗР} = 3,5$ мм при $\lambda = 10^{-6}$ м получаем $K_H(\infty) = 9 \cdot 10^4 \approx 10^5$. Полученное значение соответствует данным, приведенным в главе 1 (см. рисунок 1.4, в пояснении к которому указано, что для излучения с λ от 400 до 1400 нм, которое фокусируется на сетчатку, коэффициент оптического усиления по плотности энергии равен 100 000).

При $Z_{ЗР} \geq Z_\infty$ имеем

$$K_W(\infty) = 4 \tau_{ГЛ}(\lambda) \alpha_{ЗР}^2(\infty) / \pi \omega_C^2(\infty). \quad (2.37)$$

Подставляя в эту формулу выражение (2.26), с учетом $\lambda / \pi \Theta^2 \ll Z_{ЗР}$ получаем

$$K_W(\infty) = 6,29 \cdot 10^{-2} \tau_{ГЛ}(\lambda) [r_{ЗР}^2 n' / (\lambda f'_{ГЛ} \Theta Z_{ЗР})]^2. \quad (2.38)$$

При большом удалении от перетяжки подтверждается классический вывод: максимальная энергетическая экспозиция сетчатки уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния $Z_{ЗР}$.

2.4 Вычисление КСОЛ для глаз в поле лазерного пучка

Выведем формулу для расчета КСОЛ, исходя из следующих соображений. Поверхностью организма человека, которая в первую очередь подвергается неблагоприятному воздействию ЛИ в рассматриваемом нами спектральном диапазоне, является сетчатка глаза, поэтому именно для сетчатки реально существуют предельно допустимые уровни энергетической экспозиции, превышение которых может привести к ее

повреждению. Обозначим эти ПДУ как $H_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda)$. Тогда получаем основную формулу расчета КСОЛ для гауссова пучка по критерию поражения сетчатки глаза

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ H_{c \max}(Z_N, Y_N) H^{-1}_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda) \}, \quad (2.39)$$

где Z_N, Y_N – координаты точки N на СВВА, которая учитывается при расчете КСОЛ для глаза, центр зрачка которого в исходном положении находится в точке А.

Максимальная энергетическая экспозиция сетчатки глаза в точке Z_N $H_{c \max}(Z_N)$ имеет наибольшее значение в пределах СВВА. При нахождении центра зрачка в точке Z_N радиус распределения энергетической экспозиции сетчатки имеет минимальное значение $\omega_{c \min}$. Расстояние Z_N соответствует расстоянию $Z_{\text{ЗР } \min}$ (см. рисунок 2.7). Вывод формулы для вычисления $Z_{\text{ЗР } \min}$ достаточно сложен, поэтому на практике проще вычислять различные значения $\omega_c(Z_{\text{ЗР}})$ по формуле (2.25) для области расстояний $Z_{\text{ЗР}}$ от 0,1 до 10 м, находить значение $\omega_{c \min}$ и соответствующее ему значение $Z_N = Z_{\text{ЗР } \min}$.

Используя коэффициенты пересчета для определения максимальной энергетической экспозиции сетчатки глаза через энергию лазерного пучка (2.30) или через максимальную энергетическую экспозицию плоскости зрачка (2.33), преобразуем формулу (2.39) к следующим двум формулам для расчета КСОЛ

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ K_W(Z_N) W H^{-1}_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda) \}; \quad (2.40)$$

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ K_H(Z_N) H_{\text{ЗР } \max}(Z_N) H^{-1}_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda) \}. \quad (2.41)$$

Формулы (2.40), (2.41) нельзя применить на практике, так как значения $H_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda)$ не нормируются. В СН [17] регламентированы ПДУ энергии пучка излучения, прошедшего через зрачок диаметром 7 мм, $W_{\text{ПДУ } \text{ЗР}}(t_b, \lambda)$. При этом учтен случай острой фокусировки, пучка в пятно облучения сетчатки диаметром $d_{c \text{ ПДУ}} = 10$ мкм. Значение $H_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda)$ связано со значением $W_{\text{ПДУ } \text{ЗР}}(t_b, \lambda)$ выражением

$$H_{\text{ПДУ } c}(t_b, \lambda) = 8\tau_{\text{ГЛ}}(\lambda) W_{\text{ПДУ } \text{ЗР}}(t_b, \lambda) / (\pi d_{c \text{ ПДУ}}^2) = 2,55 \cdot 10^{10} \tau_{\text{ГЛ}}(\lambda) W_{\text{ПДУ } \text{ЗР}}(t_b, \lambda). \quad (2.42)$$

Подставляя выражение (2.42) в формулы (2.40), (2.41), получаем следующие формулы для расчета КСОЛ

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ 0,4 \cdot 10^{-10} K_W(Z_N) W \tau_{\text{ГЛ}}^{-1}(\lambda) W_{\text{ПДУ } \text{ЗР}}^{-1}(t_b, \lambda) \}, \quad (2.43)$$

$$R_{\text{СОЛ}} = \max_{\text{ТК}} \{ 0,4 \cdot 10^{-10} K_H(Z_N) H_{\text{ЗР } \max}(Z_N) \tau_{\text{ГЛ}}^{-1}(\lambda) W_{\text{ПДУ } \text{ЗР}}^{-1}(t_b, \lambda) \}. \quad (2.44)$$

Заметим, что в СН [17] и СанПин [18] коэффициент $\tau_{\text{ГЛ}}(\lambda)$ заранее учтен при нормировании и введен в значение ПДУ, поэтому следует принять, что в формулах (2.43), (2.44) $\tau_{\text{ГЛ}}(\lambda) = 1$. Кроме того при вычислении $K_W(Z_N)$, $K_H(Z_N)$ по формулам (2.30), (2.33), (2.36), (2.38) также следует считать $\tau_{\text{ГЛ}}(\lambda) = 1$.

2.5 Упрощенные методики вычисления КСОЛ и расстояний до границ лазерно опасных зон для лазерных пучков

2.5.1 Расчет диаметра пучка лазерного излучения

Приведенные в предыдущих параграфах методы вычисления радиуса (диаметра) лазерного пучка и радиуса (диаметра) пятна облучения на сетчатке, учитывающие гауссову структуру поля лазерного пучка, а также методы вычисления наибольших значений энергетической экспозиции на зрачке и на сетчатке основаны на применении достаточно сложных расчетных формул, мало удобных для практического применения с целью вычисления КСОЛ. Для практического использования необходимы более простые расчетные методики, понятные большинству специалистов, занимающихся вопросами контроля безопасного использования лазерных технологий. Как правило, такие специалисты не являются достаточно компетентными в достаточно сложной теории распространения и преобразования лазерных гауссовых пучков. Существует необходимость упростить приведенные в § 2.2 – § 2.4 методы расчетной лазерной дозиметрии. Приведенные далее упрощенные методики вычисления КСОЛ используют упрощенную коническую модель лазерного пучка, описанную в [67], и могут использоваться для оценки СОЛ для ЛИЗ, предназначенных для работы на открытых пространствах в наиболее опасной для глаз области спектра 380 – 1400 нм.

На рисунке 2.9 приведена схема облучения лазерным пучком зрачка глаза, находящегося в двух положениях 4 и 7, соответствующих расстояниям Z_1 и Z_2 (м) от выходного окна лазерного изделия 1. В соответствии с выбранной конической моделью пучка 5 его упрощенно можно представить в виде множества прямолинейных оптических лучей, направленных под небольшими углами к оси пучка 6 и ограниченных поверхностью усеченного конуса, опирающегося на некоторую плоскость сечения перпендикулярную оси пучка (например, на плоскость зрачка ЗР-ЗР'). Верхняя часть конуса ограничена плоскостью ЛИ-ЛИ' выходного окна ЛИЗ.

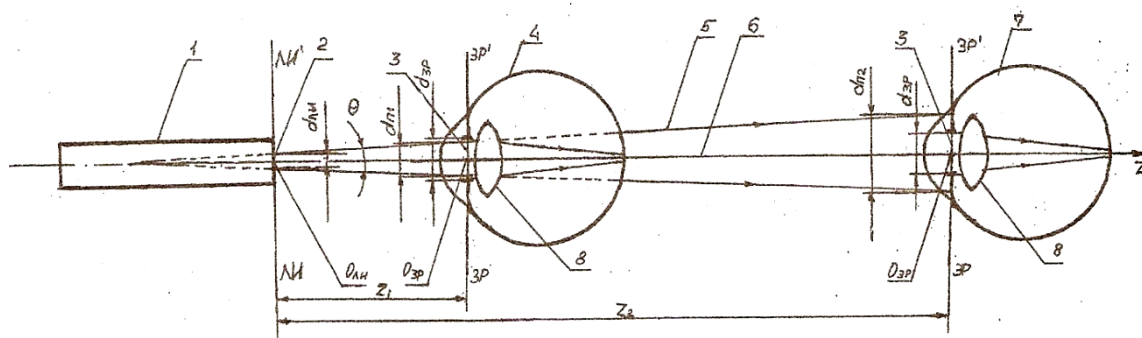


Рисунок 2.9 – Схема облучения зрачка глаза лазерным пучком: 1 – ЛИЗ; 2 – сечение лазерного пучка в плоскости выходного окна ЛИЗ; 3 – зрачок глаза; 4, 7 – положения глаз, соответствующие расстояниям Z_1 и Z_2 ; 5 – лазерный пучок; 6 – ось лазерного пучка; 8 – хрусталик глаза

Принимаем, что распределение энергетической экспозиции в лазерном пучке, показанном на рисунке 2.9, соответствует ее распределению для гауссова пучка основной TEM_{00} моды, описываемому формулой (2.8). Диаметр пучка d_{Π} (мм) излучения на расстоянии Z (м) от плоскости выходного окна ЛИЗ вычисляем по формуле

$$d_{\Pi} = d_{\text{ли}} + 10^3 Z \Theta, \quad (2.45)$$

где $d_{\text{ли}}$ (мм) – диаметр пучка на выходе ЛИЗ.

Коэффициент 10^3 применен для перехода от единиц длины, выраженных в метрах (как, например, для расстояния Z) к единицам длины, выраженным в миллиметрах. Диаметры пучка d_{Π} , $d_{\text{ли}}$ и угол расходимости Θ обычно определяют по уровню e^{-2} , т.е. по точке сечения пучка, в которой энергетическая экспозиция $H(Z)$ в e^2 раз, т.е. в 7,39 раз меньше энергетической экспозиции $H_{\text{max}}(Z)$ в центральной точке на оси пучка (см. рисунок 2.3). В случае, когда изготовители определяют этот параметр по уровню e^{-1} , для использования формул, приведенных далее, значения $d_{\text{ли}}$ и Θ , указанные в паспорте ЛИЗ, следует умножить на 1,4. Параметры $d_{\text{ли}}$ и Θ могут быть также определены «по уровню 0,1» или «по уровню 0,5». Тогда паспортные значения следует умножить либо на 0,9, либо на 1,7. *Если в паспорте ЛИЗ не указан уровень, по которому определены приведенные в паспорте значения $d_{\text{ли}}$ и Θ , следует считать, что они определены по уровню e^{-2} .*

2.5.2 Оценка СОЛ для лазерного пучка в ближней зоне

Найдем расстояние $Z_{\text{БЗ}}$ (м), при котором диаметр лазерного пучка становится равным диаметру зрачка $d_{\text{ЗР}}$, центр которого находится на оси пучка. Расстояние $Z_{\text{БЗ}}$ будем называть расстоянием до границы ближней зоны. Примем условие ближней зоны (БЗ): $d_{\Pi} = d_{\text{ЗР}}$. Тогда формула (2.45) приобретает вид

$$d_{\text{ЗР}} = d_{\text{ли}} + 10^3 Z_{\text{БЗ}} \Theta. \quad (2.46)$$

Из формулы (2.46) получаем

$$Z_{БЗ} = 10^{-3} \Theta^{-1} (d_{ЗР} - d_{ЛИ}) \quad (2.47)$$

Значения $Z_{БЗ}$ для $d_{ЗР} = 7$ мм и типичных значений $d_{ЛИ}$ и Θ приведены в таблице Е.1 Приложения Е.

Для лазерного пучка с мощностью излучения P , генерируемого в режимах непрерывного ЛИ (НЕПР ЛИ) и импульсно-модулированного ЛИ (ИМ ЛИ), будем вычислять КСОЛ по формуле

$$R_{СОЛ} = \frac{P_{ЗР}}{P_{ПДУ}} = k_{ЗР} \frac{P}{P_{ПДУ}}, \quad (2.48)$$

где $P_{ЗР}$ (Вт) = $k_{ЗР} P$ – мощность ЛИ, попадающего в зрачок глаза с диаметром $d_{ЗР} = 7$ мм;

$k_{ЗР}$ – коэффициент, показывающий долю мощности P или энергии $W_{И}$ лазерного излучения, попадающей в зрачок диаметром $d_{ЗР} = 7$ мм;

$P_{ПДУ}$ (Вт) – ПДУ мощности непрерывного лазерного излучения, проходящего через ограничивающую апертуру диаметром 7 мм, определенный по СН [17] или СанПин [18].

Для лазерного пучка с равномерным распределением интенсивности в ближней зоне $k_{ЗР} = k_{ЗРГ} = 1$. Для гауссова лазерного пучка основной TEM_{00} моды

$$k_{ЗР} = k_{ЗРГ} = 1 - e^{-2 \frac{d_{ЗР}^2}{d_{П}^2(Z)}}. \quad (2.49)$$

Для лазерного пучка импульсного ЛИ (ИМП ЛИ), а также для пучка ИМ ЛИ будем вычислять КСОЛ по формуле

$$R_{СОЛW} = \frac{W_{ИЗР}}{W_{ПДУ}} = k_{ЗР} \frac{W_{И}}{W_{ПДУ}}, \quad (2.50)$$

где $W_{ИЗР}$ (Дж) = $k_{ЗР} W_{И}$ – энергия импульса, попадающего в зрачок диаметром $d_{ЗР} = 7$ мм.

Если значения $R_{СОЛ} < 1$, $R_{СОЛW} < 1$, прямое излучение лазерного пучка можно считать безопасным; если $R_{СОЛ} \geq 1$, $R_{СОЛW} \geq 1$, прямое излучение лазерного пучка можно считать вредным или опасным для глаз.

Рассмотрим случай, когда центр зрачка глаза находится в ближней зоне, т.е. на расстоянии $Z < Z_{БЗ}$. Такой случай облучения показан на рисунке 2.9 для глаза, находящегося в позиции 4. В ближней зоне $k_{ЗРГ}$ изменяется от 1 до 0,865.

В соответствии с формулами (2.48), (2.49) для любых ЛИЗ, работающих в режимах НЕПР ЛИ или ИМ ЛИ в видимой и ближней ИК областях спектра, мощность излучения которых P указана в паспорте в милливаттах (мВт), максимальные значения КСОЛ в ближней зоне с учетом значений $P_{ПДУ}$, приведенных в таблице 1.1, определяют по одной из формул: $R_{СОЛ1} = 10P$ для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $R_{СОЛ2} = 5P$ для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм; $R_{СОЛ3} = 7,1P$ для СПИ $750 < \lambda \leq 1000$ нм; $R_{СОЛ4} = 2,9P$ для СПИ $1000 < \lambda \leq 1400$ нм. Например,

для ЛИЗ мощностью 1 мВт получаем для ближней зоны следующие максимальные значения КСОЛ: 10,0; 5,0; 7,1 и 2,9 для соответствующих СПИ.

В соответствии с формулами (2.50), (2.49) для любых ЛИЗ, работающих в режимах ИМП ЛИ, ИМ ЛИ при длительностях импульсов $\tau_{\text{и}} = 10^{-8}$ с и $\tau_{\text{и}} = 10^{-6}$ с в видимой и ближней ИК областях спектра, энергия импульса ЛИ которых $W_{\text{и}}$ указана в паспорте в *миллиджоулях (мДж)*, максимальные значения КСОЛ в БЗ с учетом значений $W_{\text{пду}}$, приведенных в таблице 1.2, определяют формулам: $R_{\text{СОЛ } w_1} = 1,3 \cdot 10^4 W_{\text{и}}$ для СПИ 380 $< \lambda \leq 600$ нм; $R_{\text{СОЛ } w_2} = 6,3 \cdot 10^3 W_{\text{и}}$ для СПИ 600 $< \lambda \leq 750$ нм; $R_{\text{СОЛ } w_3} = 2,5 \cdot 10^3 W_{\text{и}}$ для СПИ 750 $< \lambda \leq 1000$ нм; $R_{\text{СОЛ } w_4} = 1 \cdot 10^3 W_{\text{и}}$ для СПИ 1000 $< \lambda \leq 1400$ нм.

Для ЛИЗ, работающих в режимах ИМП ЛИ, ИМ ЛИ при длительности импульсов $\tau_{\text{и}} = 10^{-3}$ с в видимой и ближней ИК областях спектра, энергия импульса излучения которых $W_{\text{и}}$ указана в паспорте в *миллиджоулях (мДж)*, максимальные значения КСОЛ в БЗ определяют по одной из формул: $R_{\text{СОЛ } w_1} = 1,7 \cdot 10^3 W_{\text{и}}$ для СПИ 380 $< \lambda \leq 600$ нм; $R_{\text{СОЛ } w_2} = 8,3 \cdot 10^2 W_{\text{и}}$ для СПИ 600 $< \lambda \leq 750$ нм; $R_{\text{СОЛ } w_3} = 3,3 \cdot 10^2 W_{\text{и}}$ для СПИ 750 $< \lambda \leq 1000$ нм; $R_{\text{СОЛ } w_4} = 1,4 \cdot 10^2 W_{\text{и}}$ для СПИ 1000 $< \lambda \leq 1400$ нм. Например, для импульсных ЛИЗ с энергией импульса излучения 1 мДж и длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 10^{-3}$ с получаем в ближней зоне крайне высокие максимальные значения КСОЛ: $1,7 \cdot 10^3$; $8,3 \cdot 10^2$; $3,3 \cdot 10^2$ и $1,4 \cdot 10^2$ для соответствующих СПИ.

Значения $R_{\text{СОЛ}}$, $R_{\text{СОЛ } w}$ на границе ближней зоны (ГБЗ) получают, умножая полученные выше значения $R_{\text{СОЛ}}$ на коэффициент $k_{\text{ЗР } \Gamma} = 0,865$. Формулы для вычисления $R_{\text{СОЛ}}$, $R_{\text{СОЛ } w}$ на ГБЗ приведены в таблице Е.2 Приложения Е.

Полученные результаты показывают, что **в видимой и ближней ИК областях спектра попадание лазерного пучка в глаза человека, находящегося близко от выходного окна любого работающего лазерного изделия, чрезвычайно опасно!**

2.5.3 Оценка СОЛ для лазерного пучка в средней зоне

Рассмотрим случай, когда центр зрачка глаза находится на расстоянии Z от выходного окна ЛИЗ, незначительно превышающем $Z_{\text{БЗ}}$. Такой случай облучения зрачка показан на рисунке 2.9 для глаза, находящегося в позиции 7. При расстояниях $Z > Z_{\text{БЗ}}$ пучок лазерного излучения не полностью попадает в зрачок глаза. Найдем расстояние $Z_{\text{СЗ}}$ (м), при котором диаметр лазерного пучка становится равным $3,2 d_{\text{ЗР}}$. Расстояние $Z_{\text{СЗ}}$ будем называть расстоянием до границы средней зоны. Из формулы (2.45) получаем

$$3,2 d_{\text{ЗР}} = d_{\text{ЛИ}} + 10^3 Z_{\text{СЗ}} \Theta. \quad (2.51)$$

Из формулы (2.51) получаем

$$Z_{C3} = 10^{-3} \Theta^{-1} (3,2 d_{ЗР} - d_{ЛИ}). \quad (2.52)$$

Значения Z_{C3} для $d_{ЗР} = 7$ мм и типичных значений $d_{ЛИ}$ и Θ приведены в таблице Е.3 Приложения Е.

Коэффициенты степени опасности лазерного излучения $R_{СОЛ}$ и $R_{СОЛW}$ для лазерного пучка в средней зоне, т.е. в области расстояний от $Z_{БЗ}$ до Z_{C3} , вычисляются по формулам (2.48) для НЕПР ЛИ, ИМ ЛИ и (2.50) для ИМП ЛИ, ИМ ЛИ.

Для лазерного пучка с равномерным распределением интенсивности

$$k_{ЗР} = k_{ЗРР} = \frac{d_{ЗР}^2}{d_{П}^2} = 49 \cdot d_{П}^{-2}. \quad (2.53)$$

Для гауссова лазерного пучка основной TEM_{00} моды $k_{ЗР} = k_{ЗРГ}$. Коэффициент $k_{ЗРГ}$ вычисляются по формуле (2.49).

В таблице Е.4 Приложения Е приведены значения коэффициентов $k_{ЗРР}$, $k_{ЗРГ}$ и значения $d_{П}$, вычисленные по формулам (2.53), (2.49) и (2.45) для $d_{ЛИ} = 3$ мм, $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад. В таблице Е.4 приведены также значения $R_{СОЛ1}$, $R_{СОЛ2}$, $R_{СОЛ3}$, $R_{СОЛ4}$, вычисленные по формуле (2.48) для ЛИЗ, работающих в режимах НЕПР ЛИ или ИМ ЛИ, генерирующих пучки TEM_{00} моды и имеющих мощность ЛИ $P = 1$ мВт. Значения $R_{СОЛ1}$, $R_{СОЛ2}$, $R_{СОЛ3}$, $R_{СОЛ4}$ для ЛИЗ, имеющих мощность ЛИ P , отличную от 1 мВт, вычисляются, умножая соответствующие значения, приведенные в таблице Е.4, на значение P (мВт).

2.5.4 Оценка СОЛ для лазерного пучка в дальней зоне

При расстояниях $Z \geq Z_{C3}$ пучок лазерного излучения не полностью попадает в зрачок глаза, центр которого находится на оси пучка, причем распределение интенсивности ЛИ по поверхности зрачка можно считать равномерным. Рассматриваемую область расстояний будем называть дальней зоной. Коэффициенты степени опасности лазерного излучения $R_{СОЛ}$ и $R_{СОЛW}$ для лазерного пучка в дальней зоне будем вычислять по формуле (2.48) для НЕПР ЛИ и ИМ ЛИ и (2.50) для ИМП ЛИ, ИМ ЛИ. Для лазерного пучка с равномерным распределением интенсивности $k_{ЗР} = k_{ЗРР}$ вычисляем по формуле (2.53). Для гауссова лазерного пучка основной TEM_{00} моды в дальней зоне

$$k_{ЗР} = k_{ЗРГ} = 2 \frac{d_{ЗР}^2}{d_{П}^2} = 98 d_{П}^{-2}. \quad (2.54)$$

Рассмотрим вопрос определения расстояний до границ лазерно опасной зоны (ЛОЗ) $Z_{ЛОЗ}$ для лазерного пучка. В соответствии с СН [17] лазерно опасная зона – часть пространства, в пределах которой уровень лазерного излучения превышает ПДУ. Считаем, что ЛОЗ – это часть пространства, в пределах которой коэффициент степени

опасности лазерного излучения больше единицы. Граница ЛОЗ – это поверхность, на которой $R_{\text{СОЛ}} = 1$. Для лазерного пучка ЛОЗ ограничена плоскостью сечения, находящейся на расстоянии $Z_{\text{ЛОЗ}}$ от выходного окна излучателя. Для пучка, имеющего круглое сечение, ЛОЗ ограничена окружностью с диаметром $d_{\text{ЛОЗ}}$ (мм). Выведем формулы для вычисления $Z_{\text{ЛОЗ}}$, $d_{\text{ЛОЗ}}$, используя уравнение

$$R_{\text{СОЛ}} = k_{\text{ЗР}} \frac{P}{P_{\text{ПДУ}}} = 1. \quad (2.55)$$

Для гауссова лазерного пучка основной TEM_{00} моды получаем

$$98 d_{\text{П}}^{-2} \cdot \frac{P}{P_{\text{ПДУ}}} = 1. \quad (2.56)$$

Используя выражение (2.45), преобразуем уравнение (2.56) к следующему виду

$$\frac{98P}{(d_{\text{ЛИ}} + 10^3 \Theta Z_{\text{ЛОЗ}})^2 P_{\text{ПДУ}}} = 1. \quad (2.57)$$

Решая уравнение (2.57), получаем

$$Z_{\text{ЛОЗ}} = 10^{-3} \Theta^{-1} (9,9 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{ПДУ}}}} - d_{\text{ЛИ}}). \quad (2.58)$$

По формуле (2.45) получаем

$$d_{\text{ЛОЗ}} = d_{\text{ЛИ}} + 10^3 \Theta Z_{\text{ЛОЗ}}. \quad (2.59)$$

После подстановки выражения (2.58) в формулу (2.59) получаем

$$d_{\text{ЛОЗ}} = 9,9 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{P}{P_{\text{ПДУ}}}}. \quad (2.60)$$

Значения $Z_{\text{ЛОЗ} 1}$, $Z_{\text{ЛОЗ} 2}$, $Z_{\text{ЛОЗ} 3}$, $Z_{\text{ЛОЗ} 4}$, $d_{\text{ЛОЗ} 1}$, $d_{\text{ЛОЗ} 2}$, $d_{\text{ЛОЗ} 3}$, $d_{\text{ЛОЗ} 4}$, вычисленные по формулам (2.58) и (2.60) для ЛИЗ, работающих в режимах НЕПР ЛИ или ИМ ЛИ, приведены в таблице Е.5 Приложения Е. В таблице Е.6 приведены значения КСОЛ: $R_{\text{СОЛ} 1}$, $R_{\text{СОЛ} 2}$, $R_{\text{СОЛ} 3}$, $R_{\text{СОЛ} 4}$, вычисленные по формуле (2.48) для ЛИЗ, работающих в режимах НЕПР ЛИ или ИМ ЛИ и имеющих мощность излучения $P = 100 \text{ мВт}$. Для ЛИЗ, имеющих другую мощность излучения P , значения коэффициентов $R_{\text{СОЛ} 1}$, $R_{\text{СОЛ} 2}$, $R_{\text{СОЛ} 3}$, $R_{\text{СОЛ} 4}$ вычисляются, **умножая соответствующие значения, приведенные в таблице Е.5, на коэффициент $0,01P$, где P указывают в мВт**. При необходимости учитывать пучок с равномерным распределением интенсивности полученные значения $Z_{\text{ЛОЗ} 1} - Z_{\text{ЛОЗ} 4}$; $d_{\text{ЛОЗ} 1} - d_{\text{ЛОЗ} 4}$ **следует умножить на 0,71, а $R_{\text{СОЛ} 1} - R_{\text{СОЛ} 4}$ – умножить на 0,5**.

Для любых ЛИЗ, работающих в режимах ИМП ЛИ, ИМ ЛИ в видимой и ближней ИК области спектра при длительностях импульса $\tau_{\text{И}} = 10^{-8} \text{ с}$, $\tau_{\text{И}} = 10^{-6} \text{ с}$ и $\tau_{\text{И}} = 10^{-3} \text{ с}$, энергия импульса излучения которых $W_{\text{И}}$ указана в паспорте в **миллиджоулях (мДж)**,

коэффициент степени опасности $R_{\text{СОЛ } W}$ и значение расстояния до границы ЛОЗ для лазерного пучка $Z_{\text{ЛОЗ } W}$ (м) в средней и дальней зонах вычисляют по формулам

$$R_{\text{СОЛ } W} = K_{\text{WP}} R_{\text{СОЛ}}, \quad (2.61)$$

$$Z_{\text{ЛОЗ } W} = K_{\text{WP ЛОЗ}} Z_{\text{ЛОЗ}}, \quad (2.62)$$

где $K_{\text{WP}} = P_{\text{ПДУ}}/W_{\text{ПДУ}}$ – коэффициент пересчета по ПДУ;

$K_{\text{WP ЛОЗ}} = \sqrt{K_{\text{WP}}}$ – коэффициент пересчета по ЛОЗ;

$R_{\text{СОЛ}}$ и $Z_{\text{ЛОЗ}}$ – значение КСОЛ и значение расстояния до границы ЛОЗ, вычисленные для ЛИЗ, работающего в режиме НЕПР ЛИ и *имеющего значение мощности излучения P (мВт) численно совпадающее со значением $W_{\text{И}}$ (мДж)*.

Значения K_{WP} и $K_{\text{WP ЛОЗ}}$ приведены в таблице Е.7 Приложения Е для различных СПИ в видимой и ближней ИК областях спектра для базовых длительностей импульсов: $\tau_{\text{И}} = 10^{-8}$ с, $\tau_{\text{И}} = 10^{-6}$ с и $\tau_{\text{И}} = 10^{-3}$ с.

2.6 Примеры предварительной специальной оценки условий труда водителей транспортных средств и пилотов воздушных судов при воздействии лазерных пучков

В этом параграфе представлены результаты расчетной (предварительной) специальной оценки условий труда (ПСОУТ) водителей ТС и пилотов ВС при воздействии лазерных пучков. Под общим термином «водители транспортных средств» подразумеваются водители автотранспорта, члены локомотивных бригад подвижного состава и судоводители. СОУТ, проводимую с помощью расчетных методик, приведенных в § 2.5, автор называет «предварительной», полагая, что окончательная СОУТ проводится с применением инструментальных методов лазерной дозиметрии.

2.6.1 ПСОУТ судоводителей, пилотов ВС и водителей наземных ТС при эксплуатации лазерных навигационных и измерительных систем

На основании расчетов КСОЛ по формулам (2.48), (2.49), расстояний до границ ближней зоны $Z_{\text{БЗ}}$, средней зоны $Z_{\text{СЗ}}$ и ЛОЗ $Z_{\text{ЛОЗ}}$ по формулам (2.47), (2.52), (2.58) автором с использованием таблицы 2.1 проведена ПСОУТ судоводителей и пилотов воздушных судов в условиях эксплуатации следующих навигационных лазерных систем, использующих направленные лазерные пучки:

- лазерный створный маяк (ЛСМ) «Анемон-3» (подраздел А.2.1 Приложения А),

- курсо-гиссадная система (ЛКГС) «Глиссада-М» (подраздел А.2.2).

Кроме того проведена ПСОУТ для водителей автотранспорта при применении органами ГИБДД лазерных измерителей скорости марок «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М» (подраздел А.2.3).

Параметры лазерных пучков, генерируемых лазерными маяками (ЛМ) рассматриваемых ЛСМ и ЛКГС, параметры пучков «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М», а также результаты вычислений параметров контроля лазерной безопасности: $Z_{БЗ}$, $Z_{СЗ}$, $Z_{Л0З}$, $Z_{З0С}$ (далее параметры ЛБ) для рассматриваемых ЛИЗ приведены в таблице 2.2.

Там же приведены результаты ПСОУТ (классы (подклассы) условий труда по степени вредности и опасности) при применении этих ЛИЗ. Подробно методы вычислений и проведения оценок приведены в Приложении А. ПСОУТ для ЛКГС и ЛСМ проводилась не только для судоводителей и пилотов, но и для пользователей рассматриваемых ЛИЗ, под которыми понимаются обслуживающий персонал и наладчики, проводящие пуско-наладочные и ремонтные работы (ПНРР). Под термином «пользователи» в случаях эксплуатации «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М» понимаются как сотрудники ГИБДД, непосредственно проводящие измерения, так и другие сотрудники, находящиеся вблизи точки расположения выходных окон измерителей скорости. По результатам ПСОУТ установлено следующее.

1. Условия труда судоводителей, находящихся на расстоянии более $Z_{Л0З} = 100$ м от ЛМ, можно классифицировать как допустимые (класс 2 по таблице 2.1).

2. Условия труда судоводителей и персонала, находящихся в средней и дальней зонах пучка ЛИ на расстоянии равном или менее $Z_{Л0З}$ от ЛМ, можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.2; условия труда персонала при проведении ПНРР в ближней зоне можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.3.

3. Условия труда пилотов ВС, находящихся на расстоянии более $Z_{Л0З} = 275$ м от лазерного маяка ЛКГС «Глиссада-М» (для ЛМ с излучателем ЛИ-635-150, $P = 150$ мВт) и более $Z_{Л0З} = 416$ м (для ЛМ с излучателем ЛИ-635-300, $P = 300$ мВт), можно классифицировать как допустимые класса 2.

4. Условия труда пилотов, находящихся в дальней зоне пучка ЛИ на расстоянии равном или менее $Z_{Л0З}$ от ЛМ, с учетом форс-мажорных обстоятельств можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.2 по таблице 2.1; условия труда персонала при проведении ПНРР в ближней зоне можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.4.

Т а б л и ц а 2.2 – Результаты ПСОУТ при воздействии лазерных пучков, генерируемых различными ЛИЗ, работающими на открытых пространствах

Тип и марка ЛИЗ	Параметры пучка			Параметры ЛБ				Результаты ПСОУТ		
	λ , нм	P , мВт	Θ , рад	$Z_{БЗ}$, м	$Z_{СЗ}$, м	$Z_{ЛОЗ}$, м	$Z_{ЗОС}$, м*	Класс (подкласс) УТ для водителей ТС	Подкласс УТ для пилотов ВС	Подкласс УТ для пользователя
ЛМ ЛСМ «Анемон»	635	25	$1,5 \times 10^{-3}$	3	10	100	130	3.4 $Z \leq 50$ м	–	3.2 – 3.4 $Z \leq 50$ м
ЛМ ЛКГС «Глиссада-М» на базе ЛИ-635-150 ЛИ-635-300	635 635	300 500	8×10^{-4} для ЛОЗ	13 13	65 65	275 416	358 541	–	3.2 $Z \leq 275$ м	3.4 $Z \leq 50$ м
ЛИС «ЛИСД-2Ф» «ЛУЧ-М»	950	1	3×10^{-3}	1,3	6,5	8,3		3.2 $Z \leq 8$ м	–	3.2 $Z \leq 4$ м
ЛУК «Laser Pointer»	532	10 20 30 50	$1,5 \times 10^{-3}$	3	14	66 93 114 148	106 149 182 237	3.4 $Z \leq 4$ м	–	–
ЛУК «Laser Pointer»	532	100 200	$1,5 \times 10^{-3}$	3	14	210 296	336 474	4 $Z \leq 4$ м	3.2 $Z \leq 300$ м	–
ЛПП «ЛЦУ-ОМ-1L»	635	4	10^{-3}	4	20	41	55	3.3 $Z \leq 4$ м	–	–
ЛПП «EL 888077»	532	5	10^{-3}	4	20	67	112	3.3 $Z \leq 4$ м	–	–
ЛПП «Yukon Sight Mark»	635	5	5×10^{-4}	8	41	93	123	3.3 $Z \leq 4$ м	–	–
ЛДР «Leica Disto A5», «Agatec DM100»	635	1	6×10^{-4}	8	41	32	42	3.2 $Z \leq 4$ м	–	–
ЛДР «Stabila LE»	635	1	5×10^{-4}	8	41	38	50	3.2 $Z \leq 4$ м	–	–

* Методика и результаты вычисления $Z_{ЗОС}$ приведены в главе 3; для ЛМ ЛСМ «Анемон» и ЛМ ЛКГС «Глиссада-М», значение $Z_{ЗОС}$ определялось по формуле $Z_{ЗОС} = k_{ЗОС/ЛОЗ} Z_{ЛОЗ} = 1,3Z_{ЛОЗ}$ (см. п. Б.3)

5. Условия труда водителей автотранспорта, находящихся на расстоянии более $Z_{ЛОЗ}$ от «ЛИСД-2Ф» или «ЛУЧ-М», можно классифицировать как допустимые класса 2.

6. Условия труда водителей, находящихся на расстоянии равно или менее $Z_{ЛОЗ}$, можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.2; условия труда сотрудников ГИБДД, находящихся в ближней зоне пучка «ЛИСД-2Ф» или «ЛУЧ-М» можно классифицировать как вредные подкласса 3.2.

2.6.2 ПСОУТ пилотов ВС и водителей наземных ТС при воздействии излучения лазерных указок и других ЛИЗ гражданского назначения

В последние годы довольно часто поступает информация о применении мощных лазерных целеуказателей (лазерных указок, ЛУК) для облучения самолетов, совершающих взлет или посадку. Несанкционированное лазерное облучение воздушных судов (см. рисунок 2.10) приводит к вредному и даже опасному воздействию лазерного излучения на глаза пилотов и чревато катастрофическими последствиями для всех участников полета. Получил хождение термин «лазерное хулиганство». Имеются также данные о «лазерном хулиганстве», направленном против наземных ТС, в результате чего подвергаются опасности глаза водителей автотранспорта и машинистов поездов. Воздействие ЛИ на глаза водителей и машинистов может быть более опасным, чем для глаз пилотов самолетов, вследствие малой дистанции облучения, измеряемой иногда десятками метров, и малых углов облучения.

Действия людей, неправомерно использующих лазерные изделия в отношении транспортных средств, в настоящее время можно квалифицировать как уголовно



Рисунок 2.10 – Облучение самолета лазерным пучком

наказуемое преступление, предусмотренное статьей 267.1 УК РФ «Действия, угрожающие безопасной эксплуатации транспортных средств». Максимальным наказанием, предусмотренным ст. 267.1, является лишение свободы на срок до двух лет.

Нарастание лазерной угрозы транспорту в последние годы вызвано тем, что достижения в области полупроводниковой электроники привели к широкому выпуску лазерных полупроводниковых диодов (ЛПД), генерирующих достаточно мощное ЛИ в видимой области спектра с λ от 380 до 750 нм. На основе ЛПД разработаны различные малогабаритные и недорогие ЛИЗ, предназначенные для дистанционного наблюдения пятна облучения, формируемого лазерным пучком на какой-либо удаленной поверхности, или для наблюдения трассы распространения лазерного пучка в пространстве. К таким ЛИЗ относятся: лазерные указки, лазерные прицелы, лазерные средства пристрелки оружия, лазерные дальномеры-рулетки (см. Приложение Б). Перечисленные ЛИЗ вызывают повышенный интерес, они широко доступны (особенно через сеть интернет-магазинов), имеют сравнительно невысокую стоимость, и ***их продажа в настоящее время ничем не регламентирована.***

В последние годы разработаны мощные ЛПД, генерирующие излучение в ближней ИК области спектра от 750 до 1400 нм. Основное назначение мощных ИК ЛПД – служить источниками оптической накачки в мощных твердотельных лазерах (т.н. DPSS лазерах или

лазерах с диодной накачкой). Стало возможным создание на основе ИК ЛПД малогабаритных и экономичных DPSS лазеров, работающих от встроенных автономных источников электропитания. Начался массовый выпуск мощных «зеленых» ЛУК, работающих по схеме DPSS лазера и генерирующих излучение на длине волны 532 нм (см. рисунки 2.11, 2.12). Появление на рынке указанных *лазерных указок, являющихся по существу портативными мощными твердотельными лазерами с диодной накачкой*, значительно ухудшило ситуацию с обеспечением безопасности при массовом бесконтрольном использовании источников лазерного излучения.



Рисунок 2.11 – Мощные «синяя» и «зеленая» лазерные указки

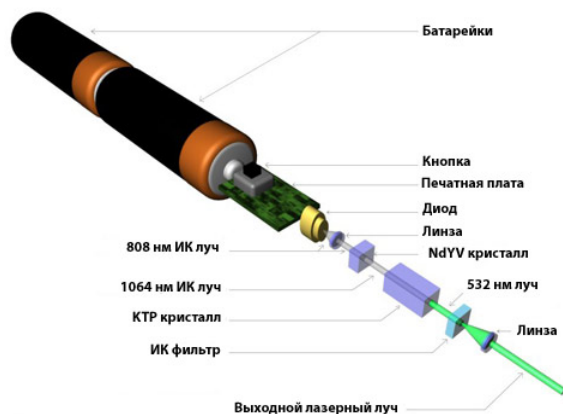


Рисунок 2.12 – Устройство «зеленой» лазерной указки на основе DPSS лазера

Кроме того в последние годы на основе ЛПД высокой мощности начался массовый выпуск мощных «синих» лазерных указок (см. рисунок 2.11), генерирующих излучение в видимой области спектра на $\lambda = 445$ нм и *имеющих мощность излучения до 1 Вт*.

Решить вопросы обеспечения лазерной безопасности в условиях широкого распространения лазерных изделий позволит лишь *введение государственного контроля за распространением опасной лазерной продукции гражданского назначения*. В свою очередь применение каких-либо мер контроля должно основываться на экспертных оценках, направленных на выявление опасных видов ЛИЗ.

Степень опасности ЛИЗ должна определяться не только путем их изначальной классификации, методы которой рассмотрены в главе 1, но и на количественных оценках СОЛ, которую можно проводить с помощью расчетных методов дозиметрии лазерного излучения на открытых пространствах, рассмотренных в предыдущем параграфе.

В таблице 2.3 приведены значения основных параметров ЛБ: $R_{\text{СОЛ}}$, $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$, $Z_{\text{ЛОЗ}}$ для ЛУК сравнительно малой мощности ($P = 1$ мВт и $P = 3$ мВт), средней мощности ($P = 20$ мВт) и высокой мощности ($P = 100, 200, 300$ и 500 мВт).

Параметры ЛБ вычислены для лазерного пучка ТЕМ₀₀ моды с углом расходимости $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад и с диаметром пучка на выходе ЛУК $d_{\text{ли}} = 3$ мм. Значения $R_{\text{СОЛ} 1}$, $Z_{\text{ЛОЗ} 1}$

вычислены для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм, т.е. для области генерации «синей» ($\lambda = 445$ нм) и «зеленой» ($\lambda = 532$ нм) ЛУК; $R_{\text{СОЛ}2}$, $Z_{\text{ЛОЗ}2}$ вычислены для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм, т.е. для области генерации «красной» ($\lambda = 635$ нм) ЛУК. В таблице 2.3 приведены также значения диаметров лазерных пучков ЛУК $d_{\text{ЛОЗ}}$ на границе ЛОЗ. При составлении таблицы 2.3 использованы данные, приведенные в таблицах Приложения Е.

Т а б л и ц а 2.3 – Значения $R_{\text{СОЛ}}$, $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$, $Z_{\text{ЛОЗ}}$ для лазерных указок

	P , мВт	1	3	20	100	200	300	500
ближняя зона	$Z_{\text{БЗ}}$, м	8	8	8	8	8	8	8
	$R_{\text{СОЛ}1}$	от 10 до 8,7	от 30 до 26	от 200 до 174	от $1 \cdot 10^3$ до 870	от $2 \cdot 10^3$ до $1,7 \cdot 10^3$	от $3 \cdot 10^3$ до $2,6 \cdot 10^3$	от $5 \cdot 10^3$ до $4,4 \cdot 10^3$
	$R_{\text{СОЛ}2}$	от 5 до 4,4	от 15 до 13	от 100 до 87	от 500 до 435	от $1 \cdot 10^3$ до 870	от $1,5 \cdot 10^3$ до $1,3 \cdot 10^3$	от $2,5 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^3$
средняя зона	$Z_{\text{СЗ}}$, м	40	40	40	40	40	40	40
	$R_{\text{СОЛ}1}$	от 8,7 до 1,8	от 26 до 5,4	от 174 до 36	от 870 до 180	от $1,7 \cdot 10^3$ до 360	от $2,6 \cdot 10^3$ до 540	от $4,4 \cdot 10^3$ до 900
	$R_{\text{СОЛ}2}$	от 4,4 до 0,9	от 13 до 2,7	от 87 до 18	от 435 до 90	от 870 до 180	от $1,3 \cdot 10^3$ до 270	от $2,2 \cdot 10^3$ до 450
дальняя зона	$Z_{\text{ЛОЗ}1}$, м	57	102	274	620	879	1078	1394
	$d_{\text{ЛОЗ}1}$, мм	31	54	140	313	443	542	700
	$R_{\text{СОЛ}1}$	от 1,8 до 1	от 5,7 до 1	от 36 до 1	от 180 до 1	от 360 до 1	от 540 до 1	от 900 до 1
	$Z_{\text{ЛОЗ}2}$, м	38	71	192	437	616	761	984
	$d_{\text{ЛОЗ}2}$, мм	22	38	99	221	312	383	495
	$R_{\text{СОЛ}2}$	< 0,9	от 2,7 до 1	от 18 до 1	от 90 до 1	от 180 до 1	от 270 до 1	от 450 до 1
Пр и м е ч а н и е – Выделенные полужирным курсивом значения $Z_{\text{ЛОЗ}1}$ и $Z_{\text{ЛОЗ}2}$ показывают, что лазерные указки с мощностью излучения $P \geq 20$ мВт опасны для глаз пилотов самолетов, осуществляющих взлет или посадку.								

На основании приведенных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Прямое лазерное излучение практически всех ЛУК является крайне опасным для глаз. *Лазерные указки с малой и средней мощностью излучения от 1 мВт до 20 мВт имеют дистанцию вероятного поражения сетчатки глаза до 270 м.*

2. «Синие» и «зеленые» ЛУК с мощностью излучения **100 – 500 мВт** и «красные» лазерные указки с мощностью излучения **200 – 500 мВт** могут **повредить сетчатку глаза человека на дистанциях до 1400 м**

3. *Любые ЛУК с мощностью излучения $P \geq 1$ мВт представляют опасность для глаз водителей наземного транспорта. При использовании ЛУК с мощностью излучения от 1 мВт до 20 мВт для водителей могут создаваться вредные условия труда подклассов 3.2, 3.3 при нахождении водителя в дальней зоне пучка и вредные подкласса 3.4 при нахождении водителя в ближней и средней зонах. При использовании ЛУК с мощностью излучения $P \geq 20$ мВт для водителей могут создаваться вредные условия труда подклассов 3.3, 3.4 при нахождении водителя в дальней зоне пучка и опасные класса 4 при нахождении водителя в ближней и средней зонах.*

4. Любые лазерные указки с мощностью излучения $P \geq 20$ мВт (т.е. с дальностью неблагоприятного воздействия более 200 м) представляют опасность для глаз пилотов воздушных судов, осуществляющих взлет или посадку. При использовании этих ЛУК могут создаваться вредные условия труда подклассов 3.3, 3.4 при нахождении пилота в дальней зоне пучка ЛИ.

В разделе Б.1 Приложения Б проведена ПСОУТ для водителей и пилотов в условиях облучения излучением широко распространенной ЛУК марки «Green laser pointer» (рисунок Б.1). Результаты ПСОУТ, подтверждающие сделанные выше выводы приведены в таблице 2.2.

В настоящее время представляется мало реальным обеспечить людей, подвергающихся риску несанкционированного облучения лазером, например, пилотов, водителей и машинистов, средствами индивидуальной защиты глаз (очками для защиты от ЛИ). Единственным эффективным средством снижения уровня лазерной угрозы является регулирование продаж лазерных изделий гражданскому населению. *При этом продажа ЛУК повышенной мощности (более 100 мВт) гражданскому населению должна быть категорически запрещена, как и реклама таких ЛИЗ в интернете.*

Такое решение будет находиться в полном соответствии с требованиями п. 6.19 СН [17], которые были рассмотрены в главе 1, и в соответствии с которыми на ОНР запрещается применение лазерных изделий III и IV класса. Лазерные указки мощностью более 100 мВт (для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм) и более 200 мВт (для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм), особо выделенные полужирным курсивом в таблице 2.3 по результатам расчетов $R_{\text{сол } 1}$, $R_{\text{сол } 2}$ в дальней зоне как чрезвычайно опасные для глаз, как раз и представляют собой официально запрещенные для применения ЛИЗ III и IV класса.

В недавно введенных в действие СанПин [18] имеется еще более жесткое требование к применению ЛИЗ на ОНР: «8.4.2.11. **Безопасное применение лазерных изделий на строительстве, при демонстрациях в учебных заведениях, в театральнo-зрелищных мероприятиях и на открытых пространствах...**, должно согласовываться с органами Роспотребнадзора... **Не требуется получения согласования при использовании лазеров 1-го класса опасности. Применение лазерных изделий 3В, 4-го классов разрешено только в средствах связи и для проецирования на экран ...**».

Таким образом, без согласования с «органами Роспотребнадзора» нельзя применять (и продавать) лазерные указки и другие ЛИЗ, имеющие мощность излучения более 0,1 мВт в СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм и более 0,2 мВт в СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм.

Свободная продажа практически всех типов ЛУК должна быть прекращена. Лазерные указки и все другие ЛИЗ, предназначенные для работы на открытых

пространствах и имеющие уровень выходной мощности (энергии), превышающий ПДУ, должны продаваться обычным гражданам исключительно по разрешению соответствующих органов.

В Приложении Б рассмотрены другие ЛИЗ гражданского назначения, которые могут представлять угрозу безопасной эксплуатации транспортных средств: лазерные прицелы (ЛПР, рисунок Б.2) для охотничьего и спортивного оружия, лазерные дальномеры-рулетки (ЛДР, рисунок Б.3). Результаты ПСОУТ в условиях воздействия ЛИ, генерируемого этими ЛИЗ, приведены в таблице 2.2. На основании приведенных результатов можно сделать следующий вывод.

ЛПР и ЛДР представляют опасность для водителей наземных транспортных средств, для которых при воздействии ЛИ от этих ЛИЗ возникают вредные условия труда подкласса 3.2; для пилотов ВС данные ЛИЗ не представляют опасности.

2.7 Результаты и выводы по материалам главы 2

1. Предложена общая модель оценки степени опасности лазерного излучения, генерируемого лазерными источниками с различными видами оптических полей (направленный лазерный пучок, диффузно отраженное или рассеянное излучение, близко расположенный или удаленный от объекта воздействия источник ЛИ). Введено понятие «коэффициент степени опасности лазерного излучения», который позволяет проводить с его помощью специальную оценку условий труда людей, находящихся в оптических полях лазерного излучения разного вида.

2. Выведены формулы, описывающие распределение энергетической экспозиции сетчатки глаза при его облучении лазерным пучком. Показано, что наибольшее значение энергетической экспозиции (облученности) сетчатки лазерным излучением соответствует наиболее опасному случаю острой фокусировки гауссова пучка и аккомодации глаза на плоскость, находящуюся вблизи перетяжки исходного пучка. При острой фокусировке на сетчатке формируется пятно облученности с минимальным диаметром 10 мкм. Результаты, полученные соискателем, подтверждены опубликованными результатами расчетов других специалистов в области ЛБ, полученными независимо друг от друга. Модель наиболее неблагоприятной фокусировки учтена при разработке ПДУ лазерного излучения, регламентированных в СН 5804 – 91 и СанПин 2.2.4 3359 – 16.

3. Предложены упрощенные методики расчета КСОЛ и расстояний до границ ближней, средней и дальней лазерно опасных зон в полях лазерных пучков,

предназначенные для практического использования персоналом служб санитарно-эпидемиологического контроля и охраны труда средней квалификации.

4. Проведена предварительная (расчетная) специальная оценка условий труда судоводителей и пилотов ВС при воздействии лазерных пучков, генерируемых лазерными навигационными системами «Анемон-3» и «Глиссада-М», а также водителей наземных ТС при воздействии пучков, генерируемых лазерными измерителями скорости марок «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М»; в результате ПСОУТ установлено, что при эксплуатации лазерных навигационных систем и измерителей скорости возможно возникновение вредных условий труда подкласса 3.2.

5. Проведена ПСОУТ водителей наземных ТС и пилотов ВС при воздействии лазерных пучков, генерируемых лазерными изделиями гражданского назначения. Наиболее неблагоприятные условия труда (вредные подкласса 3.4 и опасные класса 4) могут возникать для водителей наземных транспортных средств при воздействии излучения лазерных указок мощностью более 10 мВт. При воздействии излучения лазерных указок мощностью более 20 мВт для пилотов ВС могут возникать вредные условия труда подклассов 3.3, 3.4. Лазерные указки и все другие ЛИЗ, предназначенные для работы на открытых пространствах и имеющие уровень выходной мощности (энергии), превышающий ПДУ, не должны находиться в свободной продаже.

6. По материалам § 2.4 главы 2 соискателем в соавторстве опубликована статья в журнале «Квантовая электроника» [86]. По материалам § 2.5, § 2.6 в соавторстве с Б. Н. Рахмановым опубликованы научные статьи в журналах «Безопасность жизнедеятельности» [91], «Безопасность жизнедеятельности. Приложение» [92], «Мир транспорта» [93].

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОСЛЕПЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЛАЗЕРНОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

3.1 Расчетная методика оценки степени ослепления лазерным пучком

В этой главе рассматривается лазерное излучение, генерируемое в видимой области спектра (ЛИ с длинами волн λ от 380 до 750 нм). Ослепляющий эффект, возникающий при облучении глаз пучком ЛИ в видимой области спектра, наблюдается на расстояниях Z , превышающих расстояние до границы лазерно опасной зоны $Z_{\text{ЛОЗ}}$. Это означает, что за пределами ЛОЗ ЛИ не оказывает обратимого или необратимого поражающего действия на сетчатку глаза, но оказывает кратковременное ослепляющее действие. Это действие крайне неблагоприятно для пилотов самолетов, машинистов поездов и водителей автотранспорта, т.к. возникает ситуация временной потери визуального контроля за окружающей обстановкой. Конечно, эффект ослепления возникает и в пределах ЛОЗ, но при оценке степени опасности ЛИ в этой зоне принимают в расчет прежде всего возможность поражающего действия на сетчатку глаза, т.е. учитывают степень превышения уровня мощности ЛИ, попадающего в зрачок, над ПДУ. Следует заметить, что применяя термин «ослепление», автор имеет в виду слепящее действие лазерного излучения и совершенно не имеет в виду «ослепление» как приведение человека к слепоте, т.е. к полной утрате зрительной функции.

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие предельно допустимые уровни ЛИ, оказывающего ослепляющее (слепящее) действие на человека и, соответственно, отсутствуют методики оценки расстояний до границ зон ослепляющего действия лазерного пучка.

В классической светотехнике существует понятие «ослепленность», которое трактуется как нарушение зрительных функций, вызванное наличием в поле зрения «блеских объектов» [94]. Блескость – повышенная яркость светящихся поверхностей по отношению к яркости фона. Различают прямую и отраженную блескости. Прямая блескость связана с источником света, отраженная блескость возникает на поверхности с большим коэффициентом отражения (приближающимся к единице) по направлению к глазу. Ослепленность приводит к быстрому утомлению и снижению работоспособности.

Существуют нормы искусственного освещения, установленные в СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [95] (далее СНиП-23). Для оценки слепящего

действия прямой блескости осветительных установок в СНиП-23 используется показатель ослепленности p , который определяется по формуле

$$p = 1000 (s - 1), \quad (3.1)$$

где s – коэффициент ослепленности равный отношению пороговых разностей яркости при наличии и отсутствии ослепляющих источников в поле зрения.

Под пороговой разностью яркости понимают наименьшее заметное глазу отличие яркости объекта от яркости фона. Отношение пороговой разности яркости к яркости фона называют дифференцированным порогом. Пороговая разность яркости возрастает при увеличении яркости фона, но дифференцированный порог при нормальных условиях зрительного восприятия остается постоянной величиной [94], т.е. выполняется условие

$$\frac{\Delta L_{\Phi 1}}{L_{\Phi 1}} = \frac{\Delta L_{\Phi 2}}{L_{\Phi 2}}, \quad (3.2)$$

где $\Delta L_{\Phi 1}$ (кд·м⁻²) – пороговая разность яркости при отсутствии ослепляющего источника;

$L_{\Phi 1}$ (кд·м⁻²) – яркость фона при отсутствии ослепляющего источника;

$\Delta L_{\Phi 2}$ (кд·м⁻²) – пороговая разность яркости при наличии ослепляющего источника;

$L_{\Phi 2}$ (кд·м⁻²) – яркость фона при наличии ослепляющего источника.

Используя выражение (3.2), запишем формулу (3.1) в следующем виде

$$p = 1000 \left(\frac{\Delta L_{\Phi 2}}{\Delta L_{\Phi 1}} - 1 \right) = 1000 \left(\frac{L_{\Phi 2}}{L_{\Phi 1}} - 1 \right). \quad (3.3)$$

В СНиП-23 [95] установлены нормы наименьшего уровня освещенности для жилых и производственных помещений различного назначения. При этом для ряда помещений указывается наибольшее допустимое значение показателя ослепленности p . Наибольшие допустимые показатели p установлены также для условий освещения вне помещений (т.е. на открытых пространствах). Наибольшее нормируемое значение допустимого показателя ослепленности $p = 150$ установлено в п. 7.45 СНиП-23:

«На улицах, дорогах и транспортных зонах ... показатель ослепленности для осветительных установок не должен превышать 150».

Для такого значения p получаем допустимое отношение $L_{\Phi 2} / L_{\Phi 1} = 1,15$. Это означает, что превышение уровня яркости фона всего на 15 % при попадании в поле зрения ослепляющего источника считается неблагоприятным фактором при выполнении каких-либо зрительных работ на открытых пространствах.

В СНиП-23 для т.н. «местного освещения» нормируется максимально допустимая яркость рабочей поверхности в зависимости от площади поверхности, в частности, установлена верхняя граница максимально допустимой яркости 2000 кд·м⁻² для площади поверхности менее 0,0001 м². Этот норматив установлен по критерию допустимого превышения верхнего уровня зрительного комфорта для работников, выполняющих работы

наивысшей зрительной точности. Положим, что поверхность имеет максимально допустимый коэффициент ослепленности $p = 150$. Тогда, предполагая, что глаз адаптирован к поверхности с яркостью $2000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ получаем допустимую яркость слепящего источника $L_{\text{доп}} = 2,15 \cdot 10^3 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$.

Оценим яркость лазерного излучателя, рассматриваемого как светящаяся поверхность малых размеров. Используем определение:

«Яркость поверхности в заданной точке и в заданном направлении ... отношение силы света элемента поверхности в выбранном направлении к площади проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению силы света» [24].

Это выражается в математической форме в следующем виде

$$L = I / (dS \cdot \cos\varphi), \quad (3.4)$$

где L ($\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$) – яркость излучаемой поверхности;

I (кд) – сила света в направлении распространения излучения;

dS (м^2) – площадь элемента излучаемой поверхности;

φ (рад ; угл. град.) – угол между направлением распространения излучения и нормалью к плоскости излучающей поверхности.

Рассмотрим яркость лазерного излучателя $L_{\text{ли}}$ ($\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$) в направлении оси лазерного пучка, поэтому будем считать, что $\varphi = 0$; $\cos\varphi = 1$; $dS = S_{\text{ли}}$, где $S_{\text{ли}}$ (м^2) – площадь сечения лазерного пучка в плоскости выходного окна лазерного излучателя (см. рисунок 2.2). Тогда по формуле (3.4) получаем

$$L_{\text{ли}} = I_{\text{ли}} / S_{\text{ли}}, \quad (3.5)$$

где $I_{\text{ли}}$ (кд) – сила света лазерного излучателя в направлении распространения излучения.

Предположим, что длина волны лазерного излучения $\lambda = 556 \text{ нм}$. Тогда, учитывая определение единицы силы света (кандела), можно считать, что

$$I_{\text{ли } 556} = 683 I_{\text{е ли } 556} = 683 P / \Omega, \quad (3.6)$$

где $I_{\text{е ли } 556}$ ($\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$) = P / Ω – энергетическая сила излучения лазерного излучателя с длиной волны $\lambda = 556 \text{ нм}$ и мощностью P в направлении распространения излучения, выраженная в энергетических единицах измерения;

Ω (стер) – телесный угол, в котором распространяется лазерное излучение.

Для узконаправленного лазерного пучка с углом расходимости Θ (рад) можно считать $\Omega = (\pi / 4) \Theta^2$. Тогда из формулы (3.5) с учетом формулы (3.6) получаем

$$L_{\text{ли } 556} = 683 L_{\text{е ли } 556} = 683 P / (S_{\text{ли}} \Omega) = 1,11 \cdot 10^9 P / (d_{\text{ли}} \Theta)^2, \quad (3.7)$$

где $L_{\text{е ли } 556}$ ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$) = $P / (S_{\text{ли}} \Omega)$ – энергетическая яркость лазерного излучателя с длиной волны $\lambda = 556 \text{ нм}$ в направлении распространения излучения.

Строго говоря, понятия энергетическая сила излучения и энергетическая яркость неприменимы к лазерному пучку при точных фотометрических расчетах [37]. Реальный гауссовый пучок излучения, имеющий форму гиперboloида вращения, имеет перетяжку, расположенную, как правило, внутри резонатора лазера (см. рисунки 2.2, 2.4). Вблизи перетяжки угол расходимости пучка стремится к нулю ($\Theta \rightarrow 0$) и энергетическая сила излучения и яркость, рассчитываемые по формулам (3.6) и (3.7), становятся бесконечно большими величинами. Однако, для оценочных расчетов, проводящихся с целью сопоставления их результатов с нормированными значениями светотехнических величин, будем считать допустимым применение этих понятий для дальнейшей зоны распространения лазерного пучка. Положим, что $P = 1$ мВт; $d_{\text{ли}} = 3$ мм; $\Theta = 10^{-3}$ рад ($\Omega = 7,9 \cdot 10^{-7}$ стер). По формуле (3.7) получаем $L_{\text{ли } 556} = 1,23 \cdot 10^{11}$ кд·м⁻².

Для ЛИЗ, работающих на других длинах волн в видимой области спектра и имеющих такие же параметры лазерного пучка, вычисляют яркость $L_{\text{ли } \lambda}$, умножая значение $L_{\text{ли } 556}$ на значение относительной спектральной световой эффективности излучения $V(\lambda)$ [94]. Вычислим значения $L_{\text{ли } 445}$, $L_{\text{ли } 532}$ для ЛИЗ с мощностью излучения $P = 1$ мВт, имеющих параметры пучка: $d_{\text{ли}} = 3$ мм; $\Theta = 10^{-3}$ рад, работающих на «синей» ($\lambda = 445$ нм) и «зеленой» ($\lambda = 532$ нм) длинах волн. Используем значения $V(445) = 0,0298$, $V(532) = 0,8832$ [94]. Получаем: $L_{\text{ли } 445} = 3,67 \cdot 10^9$ кд·м⁻², $L_{\text{ли } 532} = 1,09 \cdot 10^{11}$ кд·м⁻².

Полученные оценки показывают бесперспективность применения светотехнических нормативов, предназначенных для обычных источников искусственного освещения, при оценке СОСЛ ЛП для лазерных пучков по критериям, учитываемым в СНиП-23. Яркость лазерных пучков оказывается недопустимо высокой при любых разумных значениях яркости фона (яркости адаптации).

Проведем оценку расстояния до границы зоны ослепляющего действия лазерного излучения (ЗОС) в лазерном пучке $Z_{\text{ЗОС } \lambda}$ (м), используя данные, приведенные на диаграммах инфографики [96] (рисунок 3.1), построенных по материалам международной организации International Laser Display Association (ILDA). На диаграммах, размещенных под заголовком «Воздействие лазера на пилота самолета (для зеленого лазера с длиной волны 532 нм)», более темным цветом показаны области расстояний, в пределах которых «лазерное излучение может нанести долгосрочный или **необратимый ущерб** зрению». Более светлым цветом показаны области расстояний, в пределах которых происходит «**кратковременное** ослепление».

Зону нанесения ущерба зрению лазером обозначим как ЗУЛ. Расстояние до границы ЗУЛ обозначим как $Z_{\text{ЗУЛ } \lambda}$ (м). По данным, приведенным на рисунке 3.1, для лазерного пучка мощностью $P = 50$ мВт получаем $Z_{\text{ЗУЛ } 532} = 50$ м. По таблице Е.5 Приложения Е для равного

по мощности TEM_{00} пучка с углом расходимости $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад находим $Z_{ЛОЗ\ 532} = Z_{ЛОЗ\ 1} = 437$ м. Для пучка с углом расходимости $\Theta = 10^{-3}$ рад находим вдвое меньшее значение $Z_{ЛОЗ\ 532} = Z_{ЛОЗ\ 1} = 218,5$ м. Для пучка мощностью $P = 50$ мВт с равномерным распределением интенсивности, имеющего $\Theta = 10^{-3}$ рад, после умножения полученного значения на 0,7 получаем $Z_{ЛОЗ\ 532} = Z_{ЛОЗ\ 1} = 153$ м.



Рисунок 3.1 – Инфографика «Лазерная указка – игрушка или оружие?» [96]

Сравнение значений $Z_{ЗУЛ\ 532}$ со значениями $Z_{ЛОЗ\ 532}$, вычисленными по формуле (2.58), показывает, что значения $Z_{ЗУЛ\ 532}$, приведенные на диаграммах рисунка 3.1, существенно меньше вычисленных значений $Z_{ЛОЗ\ 532}$. Будем считать, что это объясняется тем, что при определении границы ЛОЗ с использованием значений ПДУ из СН [17], учитывается возможность нанесения как необратимого, так и обратимого ущерба зрению, а при определении границы ЗУЛ возможность нанесения обратимого ущерба не учитывается.

Предположим, что при расчетах границ ЗУЛ использовались значения МРЕ, регламентированные в стандарте ИЕС 60825-1. В главе 1 было получено, что $P_{МРЕ} = 1$ мВт для $\lambda = 532$ нм. Расстояния $Z_{ЛОЗ\ 532}$, вычисленные по формуле (2.58) для значения $P_{МРЕ}$, превышающего значение $P_{ПДУ} = 0,1$ мВт по СН [17] в 10 раз, будут в $\sqrt{10} = 3,16$ раз меньше

расстояний, значения которых приведены в таблице Е.5. Так, например, для «зеленой» лазерной указки ($\lambda = 532$ нм) с мощностью излучения 50 мВт, имеющей равномерное распределение интенсивности по сечению пучка, при $d_{\text{ЛИ}} = 3$ мм, $\Theta = 10^{-3}$ рад при $P_{\text{МРЕ}} = 0,1$ мВт получаем $Z_{\text{ЛОЗ } 532} = 153/3,16 = 48,4$ м ≈ 50 м. **Это значение совпадает со значением $Z_{\text{ЗУЛ } 532} = 50$ м, указанным на диаграмме рисунка 3.1.**

Расстояния $Z_{\text{ЗОС } 532}$ до границы ЗОС, приведенные на рисунке 3.1, в пять раз превышают расстояния $Z_{\text{ЗУЛ } 532}$, т.е. $Z_{\text{ЗОС } 532} = 5 Z_{\text{ЗУЛ } 532}$. Однако представляется недостаточно правомерным использование множителя 5 для определения расстояния $Z_{\text{ЗОС } 532}$ через расстояние $Z_{\text{ЛОЗ } 532}$, вычисляемое по формуле (2.58) с использованием отечественных нормативов $P_{\text{ПДУ}}$. По-видимому, следует считать, что в пределы ЗОС, границы которых установлены организацией ILDA, включена область нанесения «обратимого» ущерба зрению, сопутствующего ослеплению. Эта область при применении отечественных нормативов попадает в пределы ЛОЗ. Таким образом, **принимая, что значения расстояний $Z_{\text{ЗОС } 532}$ для равномерного пучка должны соответствовать значениям, приведенным на рисунке 3.1.**

За пределами границы ЛОЗ пучок ЛИ имеет вид усеченного конуса, длиной $Z_{\text{ЗОС}}$, ограниченного круглым сечением с диаметром $d_{\text{ЗОС}}$. По аналогии с принципом определения границы ЛОЗ, в соответствии с которым считали, что на границе ЛОЗ значение КСОЛ равно единице ($R_{\text{СОЛ}} = 1$), будем считать, что на границе ЗОС становится равным единице некоторый **коэффициент ослепления лазерным излучением (КОСЛ) $R_{\text{ОСЛ } \lambda}$** , т. е. на границе зоны ослепления лазером $R_{\text{ОСЛ } \lambda} = 1$.

КОСЛ определим как отношение мощности лазерного излучения $P_{\text{ЗР}}$, попадающего в зрачок глаза с диаметром $d_{\text{ЗР}} = 7$ мм, к некоторому пороговому значению мощности $P_{\text{ОСЛ } \lambda}$, который назовем **порогом ослепления лазерным излучением на длине волны λ** . Для вычисления $R_{\text{ОСЛ } \lambda}$ используем следующую формулу аналогичную формуле (2.48)

$$R_{\text{ОСЛ } \lambda} = k_{\text{ЗР}} \frac{P}{P_{\text{ОСЛ } \lambda}}. \quad (3.8)$$

Для определения расстояния до границы ЗОС применяем уравнение

$$k_{\text{ЗР}} \frac{P}{P_{\text{ОСЛ } \lambda}} = 1. \quad (3.9)$$

Преобразуем уравнение (3.9) для лазерного пучка с равномерным распределением интенсивности к следующему виду

$$\frac{49P}{(d_{\text{ЛИ}} + 10^3 \Theta Z_{\text{ЗОС } \lambda})^2 P_{\text{ОСЛ } \lambda}} = 1. \quad (3.10)$$

С учетом всегда выполняющегося условия $d_{\text{ЛИ}} \ll 10^3 \Theta Z_{\text{ЗОС } \lambda}$ получаем

$$P_{\text{ОСЛ } \lambda} = 4,9 \cdot 10^{-5} P (\Theta Z_{\text{ЗОС } \lambda})^{-2}. \quad (3.11)$$

Из данных рисунка 3.1 для $P = 50$ мВт; $\lambda = 532$ нм имеем $Z_{\text{ЗОС } 532} = 250$ м. Для «зеленой» лазерной указки с мощностью излучения $P = 50$ мВт и углом расходимости $\Theta = 10^{-3}$ рад, по формуле (3.11) получаем **значение порога ослепления лазерным излучением на длине волны 532 нм $P_{\text{Осл } 532} = 0,039$ мВт = $3,9 \cdot 10^{-5}$ Вт.** Значение порога ослепления лазерным излучением $P_{\text{Осл } \lambda}$ на любой другой длине волны λ в видимой области спектра зависит от световой чувствительности глаза и рассчитывается по формуле

$$P_{\text{Осл } \lambda} = k_v(\lambda) \cdot P_{\text{Осл } 532}, \quad (3.12)$$

где $k_v(\lambda) = V(532) / V(\lambda)$.

Из выражения (3.11) для пучка с равномерным распределением интенсивности получаем

$$Z_{\text{ЗОС } \lambda} = 7 \cdot 10^{-3} \Theta^{-1} \sqrt{\frac{P}{P_{\text{Осл } \lambda}}} = 7 \cdot 10^{-3} \Theta^{-1} \sqrt{\frac{k_v^{-1}(\lambda) P}{P_{\text{Осл } 532}}} = 3,54 \cdot 10^{-2} \Theta^{-1} \sqrt{k_v^{-1}(\lambda) P}, \quad (3.13)$$

где в последнем выражении **P указывают в мВт.**

Диаметр круга $d_{\text{ЗОС } \lambda}$ (мм), ограничивающего ЗОС, для лазерного излучения с длиной волны λ вычисляют по формуле

$$d_{\text{ЗОС } \lambda} = 10^{-3} \Theta Z_{\text{ЗОС } \lambda}. \quad (3.14)$$

Для пучка основной TEM_{00} моды **значения $Z_{\text{ЗОС } \lambda}$, $d_{\text{ЗОС } \lambda}$ следует умножить на 1,41.**

Значения $Z_{\text{ЗОС } 532}$ (м) и $d_{\text{ЗОС } 532}$ (мм), вычисленные по формулам (3.13) и (3.14) с учетом коэффициента 1,41 для ЛИЗ, работающих в режиме TEM_{00} моды на $\lambda = 532$ нм, и имеющих различную мощность излучения **P (мВт)**, приведены в таблице 3.1.

Т а б л и ц а 3.1 – Значения расстояний до границ зон ослепления лазером $Z_{\text{ЗОС } 532}$ и диаметров пучка лазерного излучения на границе ЗОС $d_{\text{ЗОС } 532}$ для лазерного изделия, работающего в режиме основной TEM_{00} моды на длине волны 532 нм и имеющего различную мощность ЛИ

P , мВт	1	3	5	10	15	20	30	50	100	150	200	300	500
$Z_{\text{ЗОС } 532}$, м	100	173	223	316	386	446	546	705	997	1221	1410	1727	2300
$d_{\text{ЗОС } 532}$, мм	54	92	114	162	197	227	278	357	502	615	709	867	1120

Пр и м е ч а н и е – Значения $Z_{\text{ЗОС } 532}$ и $d_{\text{ЗОС } 532}$ вычислены для $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад и $d_{\text{Ли}} = 3$ мм.

Спектральная чувствительность глаза различна в условиях ночного и дневного зрения, причем в ночных условиях значительно возрастает чувствительность к излучению «синего» ($\lambda = 445$ нм) лазера, в то время как чувствительность к излучению «зеленого» ($\lambda = 532$ нм) и «красного» ($\lambda = 635$ нм) лазеров уменьшается. В соответствии с [25] относительные спектральные световые эффективности для ночного зрения имеют значения $V_{\text{Н}}(532) = 0,7643$, $V_{\text{Н}}(445) = 0,3931$, а для дневного зрения – $V_{\text{Д}}(532) = 0,8832$, $V_{\text{Д}}(445) = 0,0298$. Для $\lambda = 445$ нм получаем $k_{v \text{ Н}}(445) = V_{\text{Н}}(532) / V_{\text{Н}}(445) = 1,94$ и $k_{v \text{ Д}}(445) = V_{\text{Д}}(532) / V_{\text{Д}}(445) = 29,64$.

Применим принцип учета наихудших условий воздействия, т.е. будем вычислять наибольшие возможные значения расстояний до границ ЗОС и, следовательно, использовать в вычислениях $P_{\text{ОСЛ}\lambda}$, $Z_{\text{ЗОС}\lambda}$ по формулам (3.12, 3.13) наименьшие из значений $k_{\text{VН}}(\lambda)$ или $k_{\text{VD}}(\lambda)$. Для $\lambda = 445$ нм используем наименьший коэффициент $k_{\text{VН}}(445) = 1,94$; тогда получаем: $P_{\text{ОСЛ}445} = 0,076 \text{ мВт} = 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$, $Z_{\text{ЗОС}445} = 1,94^{-1/2} Z_{\text{ЗОС}532} = 0,71 Z_{\text{ЗОС}532}$.

3.2 Методы определения размеров зон лазерной угрозы безопасности эксплуатации воздушных судов

3.2.1 Общая постановка задачи определения пространственных областей и зон лазерной угрозы безопасности эксплуатации ВС

Расчетные методы лазерной дозиметрии на открытых пространствах, которые рассмотрены в параграфах 2.5 и 3.1, позволяют оценить размеры областей и зон вероятного неблагоприятного воздействия лазерного излучения (ОВЛ и ЗВЛ) на глаза пилота ВС, осуществляющего взлет, посадку и полет. Эти параметры в совокупности с минимальной опасной высотой полета $H_{\text{Пmin}}$, при достижении которой возникает вероятность неблагоприятного воздействия на глаза пилота излучением ЛИЗ, расположенного на земной поверхности (далее – минимальная опасная высота полета), будем в дальнейшем называть пространственными параметрами зон лазерной опасности для воздушного судна (ПЗЛО ВС). Знание ПЗЛО ВС позволяет провести организационно-технические мероприятия, обеспечивающие лазерную безопасность воздушных судов в процессе их эксплуатации, а также выработать критерии применимости юридических санкций к лицам, нарушающим правила ЛБ по отношению к ВС.

На рисунке 3.2 показана обобщенная условная схема полета и посадки ВС, находящегося в трех последовательных фазах движения: фаза I – горизонтальный полет параллельно плоскости земной поверхности (ПЗП) (фаза полета); фаза II – плавное снижение и заход на посадку (фаза посадки) и фаза III – движение с торможением по взлетно-посадочной полосе (ВПП) (фаза приземления). Схема показана в проекции на вертикальную плоскость, проходящую через линию 5, показывающую курс полета, и линию 7, показывающую направление посадки (глиссаду). Для упрощения принимаем, что на протяжении всей фазы II движение по глиссаде осуществляется в одной вертикальной плоскости (без разворотов) под постоянным углом наклона глиссады γ (угл. град, рад) к ПЗП (далее – угол глиссады).

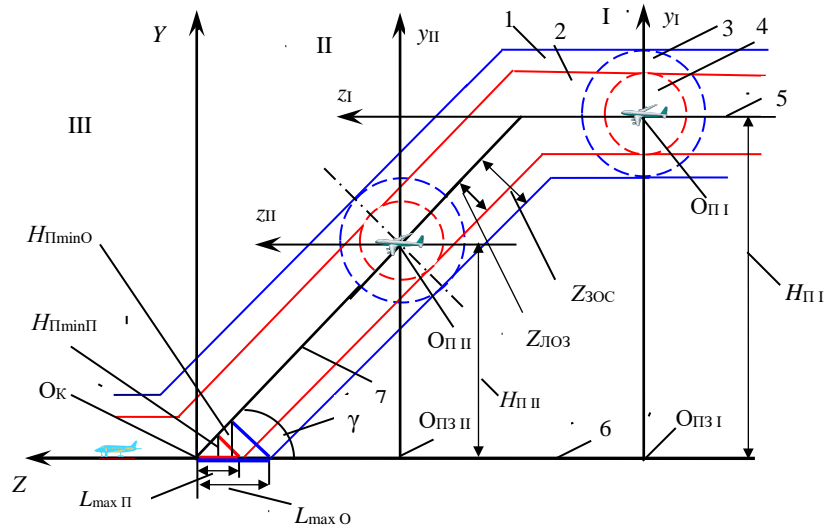


Рисунок 3.2 – Обобщенная схема оценки пространственных параметров областей лазерной опасности для ВС, находящегося в фазах полета, посадки и приземления: 1 – цилиндрическая ОВЛ О; 2 – цилиндрическая ОВЛ П; 3 – сферическая ОВЛ О; 4 – сферическая ОВЛ П; 5 – курс полета; 6 – плоскость земной поверхности (ПЗП); 7 – глиссада

Положение ВС в пространстве характеризуется точкой полета $O_{\text{П}}$. На рисунке 3.2 используются две системы прямоугольных координат: система XYZ , связанная с ПЗП, и система xyz , связанная с воздушным судном. Начало системы координат XYZ находится в точке касания $O_{\text{К}}$ воздушного судна земной поверхности (точка приземления), а начало системы координат xyz находится в точке $O_{\text{П}}$. Ось Y направлена перпендикулярно вверх из $O_{\text{К}}$; ось y направлена вверх вдоль линии, соединяющей точку $O_{\text{П}}$ с ПЗП. Оси Z, z направлены вперед по курсу полета, причем ось Z направлена вдоль линии проекции курса полета и глиссады на ПЗП, а ось z направлена вдоль линии проекции курса полета и глиссады на плоскость полета, проходящую через $O_{\text{П}}$ параллельно ПЗП. Вертикальная координата точки $O_{\text{П}}$ в системе XYZ равна высоте полета $H_{\text{П}}$ (м). Проекция точек $O_{\text{П}}$ на ПЗП обозначены как $O_{\text{П I}}$ и $O_{\text{П II}}$. Для каждой точки $O_{\text{П}}$ существуют две пространственные сферические области вероятного воздействия лазерного излучения на пилота ВС:

- область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию кратковременного ослепления пилота (ОВЛ О) 3, ограниченная соответствующей сферой СВЛ О, показанной в сечении штриховой линией синего цвета;

- область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию поражения сетчатки глаз пилота (ОВЛ П) 4, ограниченная соответствующей сферой СВЛ П, показанной в сечении штриховой линией красного цвета.

Радиусом СВЛ О является *максимальное расстояние от излучателя до границы зоны ослепления лазером Z_{3OC}* , а радиусом СВЛ П является *максимальное расстояние от излучателя до границы лазерно опасной зоны $Z_{ЛОЗ}$* .

Исходя из принципа учета наибольшего риска, будем принимать в расчет вероятность применения против ВС наиболее опасных в настоящее время ЛУК,

Положение ВС в пространстве характеризуется точкой полета $O_{\text{П}}$. На рисунке 3.2 используются две системы прямоугольных координат: система XYZ , связанная с ПЗП, и система xyz , связанная с воздушным судном.

Начало системы координат XYZ находится в точке касания $O_{\text{К}}$ воздушного судна земной поверхности (точка приземления), а начало системы координат xyz находится в точке $O_{\text{П}}$. Ось Y направлена перпендикулярно вверх из $O_{\text{К}}$; ось y направлена вверх вдоль линии, соединяющей точку $O_{\text{П}}$ с ПЗП. Оси Z, z направлены вперед по курсу полета, причем ось Z направлена вдоль линии проекции курса полета и глиссады на ПЗП, а ось z направлена вдоль линии проекции курса полета и глиссады на плоскость полета, проходящую через $O_{\text{П}}$ параллельно ПЗП. Вертикальная координата точки $O_{\text{П}}$ в системе XYZ равна высоте полета $H_{\text{П}}$ (м). Проекция точек $O_{\text{П}}$ на ПЗП обозначены как $O_{\text{П I}}$ и $O_{\text{П II}}$. Для каждой точки $O_{\text{П}}$ существуют две пространственные сферические области вероятного воздействия лазерного излучения на пилота ВС:

- область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию кратковременного ослепления пилота (ОВЛ О) 3, ограниченная соответствующей сферой СВЛ О, показанной в сечении штриховой линией синего цвета;

- область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию поражения сетчатки глаз пилота (ОВЛ П) 4, ограниченная соответствующей сферой СВЛ П, показанной в сечении штриховой линией красного цвета.

Радиусом СВЛ О является *максимальное расстояние от излучателя до границы зоны ослепления лазером Z_{3OC}* , а радиусом СВЛ П является *максимальное расстояние от излучателя до границы лазерно опасной зоны $Z_{ЛОЗ}$* .

Исходя из принципа учета наибольшего риска, будем принимать в расчет вероятность применения против ВС наиболее опасных в настоящее время ЛУК,

находящихся в свободной продаже. Анализ рекламных материалов, опубликованных в интернете за последние 2 года, показывает, что по критерию поражающего воздействия (т.е. по наибольшей мощности излучения P) и по критерию вероятного объема продаж за последние годы в настоящее время наибольшую угрозу безопасности представляет «синяя» ($\lambda = 445$ нм) лазерная указка, имеющая мощность излучения $P = 1$ Вт.

В последние годы в интернете появилась реклама значительно более мощных ЛУК с мощностью лазерного пучка до 30 Вт (например, ЛУК серий «Blaster» и «Zver»). Однако в дальнейших расчетах все же будем ориентироваться на наибольшую мощность доступных сегодня ЛУК $P = 1$ Вт, полагая, что объем продаж сверхмощных ЛУК пока еще незначителен из-за достаточно высокой цены изделий. Учет физиологических особенностей сетчатки глаза человека показывает, что **наиболее неблагоприятной длиной волны по критерию временного ослепления человека является «зеленая» $\lambda = 532$ нм.** В интернете рекламируются несколько типов ЛУК, работающих на $\lambda = 532$ нм и имеющих наибольшее значение $P = 500$ мВт. Указанные «синие» и «зеленые» ЛУК имеют угол расходимости лазерного пучка $\Theta = 10^{-3}$ рад.

По формулам, приведенным в параграфах 2.5 и 3.1, для выбранных ЛУК получаем:

$$Z_{\text{ЛОЗ}} \approx 1000 \text{ м}, Z_{\text{ЗОС}} \approx 1150 \text{ м} - \text{ для ЛУК с } \lambda = 445 \text{ нм}, P = 1 \text{ Вт};$$

$$Z_{\text{ЛОЗ}} \approx 700 \text{ м}, Z_{\text{ЗОС}} \approx 1200 \text{ м} - \text{ для ЛУК с } \lambda = 532 \text{ нм}, P = 0,5 \text{ Вт}.$$

Для оценки ПЗЛО ВС принимаем в качестве максимального расстояния до границы зоны ослепления лазером $Z_{\text{ЗОС}} = 1200$ м, а в качестве максимального расстояния до границы лазерно опасной зоны $Z_{\text{ЛОЗ}} = 1000$ м.

При движении воздушного судна сферы СВЛ О и СВЛ П формируют в пространстве цилиндрические области вероятного воздействия ОВЛ О (1) и ОВЛ П (2), ограниченные соответствующими цилиндрическими поверхностями ЦВЛ О и ЦВЛ П, показанными на рисунке 3.2 в сечении сплошными линиями синего и красного цвета.

Исходя из рассматриваемой схемы, можно сделать вывод, что любое лазерное изделие с мощностью излучения, не превышающей 1 Вт (при $\lambda = 445$ нм) и 0,5 Вт (при $\lambda = 532$ нм), находящееся за пределами ЦВЛ О, не представляет опасности для экипажа ВС, где бы не располагалось это ЛИЗ – в окружающем пространстве или на земной поверхности. Поскольку радиус ЦВЛ О равен 1200 м, **любое ЛИЗ (с мощностью излучения, не превышающей 1 Вт при $\lambda = 445$ нм и 0,5 Вт при $\lambda = 532$ нм), направляющее лазерный пучок с земной поверхности на воздушное судно, находящееся в фазе полета или на участке фазы посадки на высоте более 1500 м, не может привести даже к кратковременному ослеплению пилота и является полностью безопасным.** Естественно, пилоты будут отчетливо видеть лазерный пучок того или иного цвета в

окружающем пространстве, что может вызывать некоторый отвлекающий эффект, но вряд ли это будет создавать угрозу полету.

Совершенно другая ситуация может возникнуть на завершающей стадии фазы посадки, которую мы рассмотрим более подробно. При пересечении ЦВЛ О и ЦВЛ П с плоскостью земной поверхности образуются плоские фигуры в форме эллипса (рисунок 3.3). Площадки, расположенные внутри этих эллипсов будем называть зонами вероятного воздействия лазерного излучения по критерию ослепления пилота (ЗВЛ О) (1, рисунок 3.3) и по критерию поражения сетчатки глаз пилота (ЗВЛ П) (2, рисунок 3.3). Расстояния

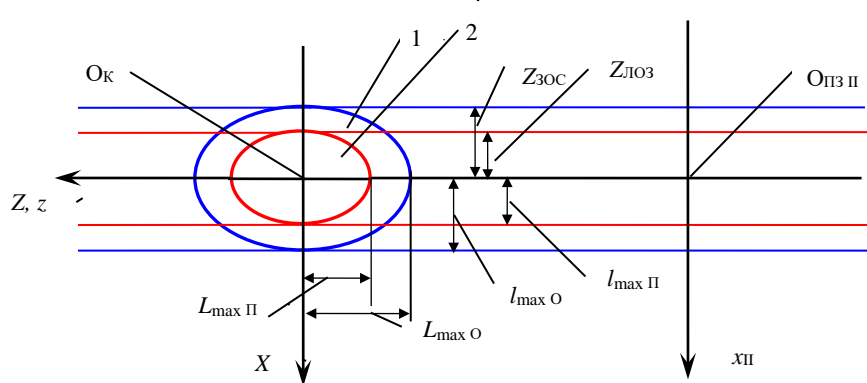


Рисунок 3.3 – Обобщенная схема оценки параметров зон лазерной опасности для ВС, находящегося в фазах посадки и приземления в проекции на плоскость земной поверхности: 1 – ЗВЛ О; 2 – ЗВЛ П

$L_{\max O}$ (м, км) и $L_{\max П}$ (м, км) от точки касания O_k до наиболее удаленных точек границ ЗВЛ О и ЗВЛ П равны длинам больших полуосей эллипсов, ограничивающих ЗВЛ О и ЗВЛ П. В соответствии с рисунком 3.2 получаем:

$L_{\max O} = Z_{30C} / \sin \gamma$, $L_{\max П} = Z_{103} / \sin \gamma$. Для ВС типа аэроплана (например, авиалайнеров) углы глиссады имеют малые значения, и можно применять упрощенные формулы $L_{\max O} = \gamma^{-1} Z_{30C}$, $L_{\max П} = \gamma^{-1} Z_{103}$. Для гражданских ВС типичным является значение $\gamma \approx 3$ угл. град = 0,05 рад. Для рассматриваемого обобщенного случая модели точечного ВС уязвимого со всех сторон для лазерного пучка, получаем $L_{\max O} = 24$ км и $L_{\max П} = 20$ км. Поперечные размеры ЗВЛ О и ЗВЛ П $l_{\max O}$ (км) и $l_{\max П}$ (км) (рисунок 3.3) равны длинам малых полуосей эллипсов, ограничивающих ЗВЛ О и ЗВЛ П, т.е. $l_{\max O} = Z_{30C} = 1,2$ км; $l_{\max П} = Z_{103} = 1$ км.

3.2.2 Учет конструкции и размеров кабины пилота при определении ПЗЛО ВС

Современные воздушные суда гражданской авиации имеют кабину пилота, расположенную в верхней части фюзеляжа ВС, а обзор окружающего пространства осуществляется через смотровое окно расположенное перед пилотом на некоторой высоте над полом кабины (рисунок 3.4). При движении по глиссаде в начальной области

эллиптической ЗВЛ О такое ВС находится в зоне недоступности (мертвой зоне) для любых ЛУК, расположенных на ПЗП. Лазерные пучки таких ЛИЗ, имеют достаточно большие углы наклона α к ПЗП (углы цели) и не могут проникнуть в кабину пилота и тем самым не представляют никакой угрозы безопасности полета. Ситуация облучения ВС лазерным пучком в пределах мертвой зоны отображена на рисунке 2.10. Очевидно, что показанный случай облучения не представляет никакой опасности для пилота, поскольку источник ЛИ находится в мертвой зоне по отношению к кабине пилота.



Рисунок 3.4 – Вид кабины пилота ВС гражданской авиации

Определим при каких высотах полета H_{min} и при каких углах цели α_{min} возникает реальная угроза безопасности ВС, т.е. при каких значениях этих параметров лазерный пучок может попадать в глаза пилота ВС, находящегося на рабочем месте.

На рисунках 3.5, 3.6 показаны схемы оценки ПЗЛО ВС для ВС, имеющего кабину пилота закрытую со стороны нижней полусферы. На рисунке 3.5 показана схема в вертикальной проекции на плоскость XO_kY , на рисунке 3.6 – в вертикальной проекции на плоскость ZO_kY . Сечения кабины пилота 1 на рисунках 3.5 и 3.6 представлены в виде круга с центром в точках полета $O_{\text{п}}$.

Внутри кабины над полом 4 (рисунок 3.5) расположено рабочее место пилота. Для определения ПЗЛО ВС будем использовать пространственные усредненные параметры рабочего места оператора лазерной установки, применяемые в ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 [34]. В соответствии с [34] принимаем, что область пространства, в которой может находиться голова пилота во время выполнения им рабочих операций, ограничена *границей зоны возможного поражения глаз* (ГЗГ). ГЗГ (3) представляет собой условную вертикально расположенную цилиндрическую поверхность радиусом $R_{\text{ГЗГ}}$ (м), ограниченную верхней и нижней плоскостями, находящимися на расстояниях $h_{\text{ГЗГ } 1}$ (м) и $h_{\text{ГЗГ } 2}$ (м) над плоскостью пола 4 кабины пилота 1.

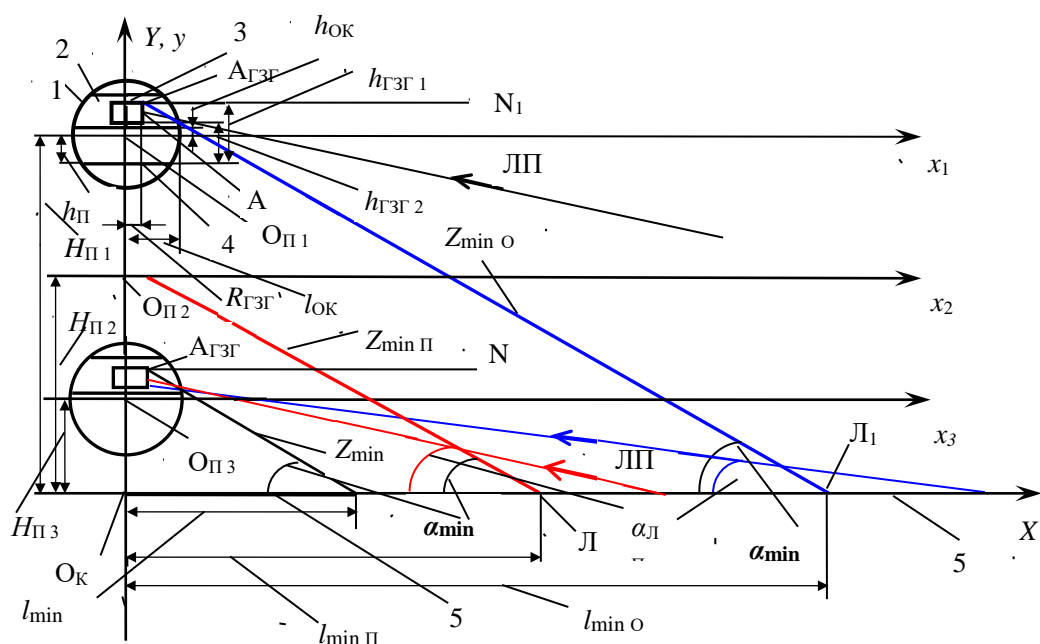


Рисунок 3.5 – Схема оценки параметров зон лазерной опасности для ВС, имеющего кабину пилота закрытую со стороны нижней полусферы, в вертикальной проекции на плоскость XO_KY :
1 – кабина пилота; 2 – смотровое окно; 3 – ГЗГ; 4 – пол кабины; 5 – ПЗП

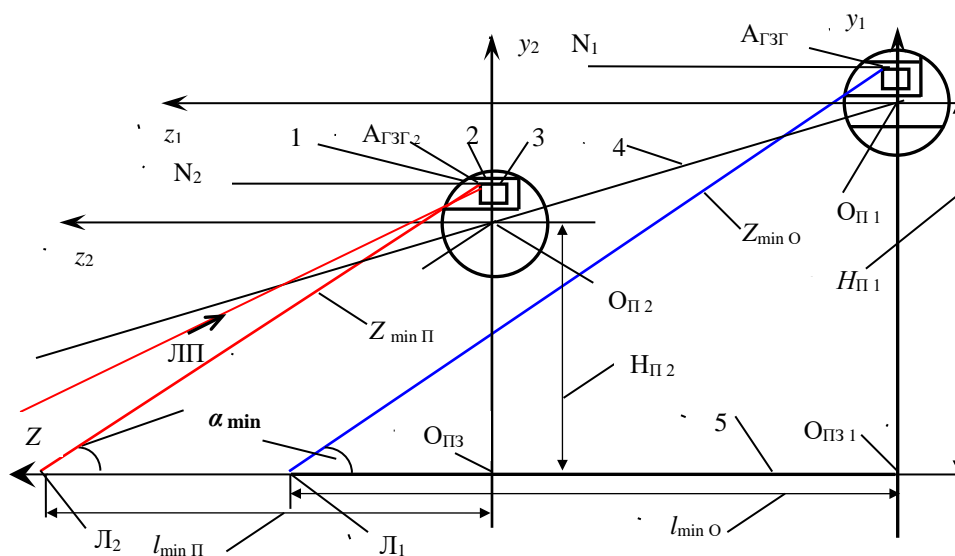


Рисунок 3.6 – Схема оценки параметров зон лазерной опасности для ВС, имеющего кабину пилота закрытую со стороны нижней полусферы, в вертикальной проекции на плоскость ZO_KY :
1 – кабина пилота; 2 – смотровое окно; 3 – ГЗГ; 4 – глиссада; 5 – ПЗП

Нижняя кромка смотрового окна 2 расположена на высоте $h_{ок}$ (м) над горизонтальной осью симметрии x (рисунок 3.5) кабины пилота. Полуширина нижней кромки окна имеет длину $l_{ок}$ (м). Первое положение кабины пилота на рисунке 3.5, соответствующее точке полета $O_{П1}$, характеризуется тем, что пучок ЛИ с минимальной длиной $Z_{min O}$, уже **опасный по критерию ослепления**, достигает ГЗГ в критической точке контроля $A_{ГЗГ}$. Этот лазерный пучок, исходящий из точки L_1 на ПЗП, показан сплошной линией синего цвета. Любой другой пучок, направляемый с земной поверхности в сторону

ВС и пересекающий ГЗГ в любой точке, находится в секторе пространства, ограниченном отрезками $A_{ГЗГ}N_1$ и $A_{ГЗГ}L_1$. Естественно, длина такого лазерного пучка больше $Z_{\min O}$, и он еще не представляет никакой угрозы по критерию ослепления пилота.

Второе положение кабины пилота (не показанной на рисунке 3.5), соответствующее точке $O_{П2}$, характеризуется тем, что лазерный пучок с минимальной длиной $Z_{\min П}$, уже **опасный по критерию поражения глаз**, достигает ГЗГ в критической точке контроля $A_{ГЗГ}$. Этот пучок, исходящий из точки L_2 на ПЗП, показан сплошной линией красного цвета.

Третье наиболее опасное положение кабины пилота (рисунок 3.5), соответствующее точке полета $O_{П3}$, характеризуется тем, что **ВС находится как в зоне ослепления так и в зоне поражения глаз пилота**. В этом случае ВС уязвимо для лазерного пучка с длиной, не превышающей $Z_{\min O}$ или $Z_{\min П}$, и имеющего угол цели $\alpha_{ЛП} < \alpha_{\min}$. Точка Л нахождения ЛИЗ, генерирующего такой пучок, должна, естественно, находиться в пределах эллипсов, ограничивающих ЗВЛ О и ЗВЛ П. Опасные для пилота пучки ЛИ показаны на рисунке 3.5 тонкими сплошными линиями синего и красного цвета. При этом пучки, имеющие длину менее Z_{\min} и углы цели более α_{\min} , не представляют угрозы пилоту, т.к. соответствующие ЛИЗ оказываются в мертвой зоне по отношению к ВС. Радиус мертвой зоны показан на рисунке 3.5 утолщенной линией черного цвета.

Для вычисления ПЗЛО ВС используем следующую формулу расчета минимальной опасной высоты полета при входе в ЗВЛ О (см. рисунок 3.5).

$$H_{П\min O} + h_{A_{ГЗГ}} = Z_{\min O} \sin \alpha_{\min}, \quad (3.15)$$

где $h_{A_{ГЗГ}}(м) = h_{ГЗГ1} - h_{П}$ – высота критической точки контроля $A_{ГЗГ}$ над горизонтальной осью симметрии x кабины пилота.

Для определения α_{\min} используем формулу

$$h_{ГЗГ1} - h_{П} - h_{OK} = (l_{OK} - R_{ГЗГ}) \operatorname{tg} \alpha_{\min}. \quad (3.16)$$

Из формулы (3.16) получаем

$$\alpha_{\min} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} k, \quad (3.17)$$

где $k = (h_{ГЗГ1} - h_{П} - h_{OK}) / (l_{OK} - R_{ГЗГ})$; $h_{ГЗГ1} = h_{ГЗГ2} + \Delta h_{ГЗГ}$; $\Delta h_{ГЗГ}$ – высота ГЗГ.

В соответствии с ГОСТ [30]: $R_{ГЗГ} = 20$ см; $h_{ГЗГ2} = 0,6 h_P$ (h_P – средний рост пилота).

Принимаем $\Delta h_{ГЗГ} = 30$ см; $h_P = 180$ см; $h_{П} = 30$ см; $h_{OK} = 60$ см; $l_{OK} = 150$ см. Тогда получаем: $h_{ГЗГ2} = 108$ см; $h_{ГЗГ1} = 138$ см; $\alpha_{\min} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0,36$; $\alpha_{\min} = 0,35 \text{ рад} = 20 \text{ угл. град.}$

Принимаем $Z_{\min O} = Z_{3OC} = 1200$ м. По формуле (3.15) получаем $H_{П\min O} \approx 410$ м. Без учета $R_{ГЗГ}$ из рисунка 3.6 имеем $l_{\min O} = Z_{\min O} \cos \alpha_{\min} \approx 1130$ м. Применяя формулу (3.15) для

$H_{\text{Пmin П}}$ и $Z_{\text{min П}} = Z_{\text{ЛОЗ}} = 1000$ м, получаем: $H_{\text{Пmin П}} \approx 340$ м. Без учета $R_{\text{ГЗГ}}$ из рисунка 3.5 имеем $l_{\text{min П}} = Z_{\text{min П}} \cos \alpha_{\text{min}} \approx 940$ м.

Расстояния $L_{\text{max O}}$ и $L_{\text{max П}}$ в соответствии с рисунком 3.2 находим по формулам: $L_{\text{max O}} = H_{\text{Пmin П}} \operatorname{ctg} \gamma \approx \gamma^{-1} \cdot H_{\text{Пmin O}}$; $L_{\text{max П}} = H_{\text{Пmin П}} \operatorname{ctg} \gamma \approx \gamma^{-1} H_{\text{Пmin П}}$. Для выбранных значений $Z_{\text{ЛОЗ}}$ и $Z_{\text{ЛОЗ}}$ и $\gamma = 3$ угл. град получаем $L_{\text{max O}} = 8,2$ км; $L_{\text{max П}} = 6,8$ км.

Значения параметров зон лазерной опасности, полученные с учетом конструктивных особенностей кабины пилота ВС и параметров рабочего места пилота, имеют существенно меньшие значения по сравнению с данными, полученными в предыдущем разделе по модели точечного ВС уязвимого для ЛП со всех сторон.

3.2.3 Учет угла поля зрения пилота при определении ПЗЛО ВС

Рисунок 3.4 наглядно демонстрирует, что при выполнении пилотом рабочих операций по управлению самолетом в наиболее ответственной фазе движения – посадке ВС, взгляд пилота направлен строго вперед по курсу полета. Вряд ли следует ожидать поворотов головы пилота в боковых направлениях при штатном выполнении посадки. Полный угол поля зрения пилота $2\beta_{\text{ЗР}}$ в таком положении меньше угла 180 угл. град, который мы принимали в расчет в предыдущем параграфе. Учет реального значения угла поля зрения приводит к дополнительному уменьшению значений ПЗЛО ВС. Схема для расчета ПЗЛО ВС с учетом угла поля зрения пилота приведена на рисунке 3.7. Реальные границы ЗВЛ О и ЗВЛ П с учетом угла поля зрения $2\beta_{\text{ЗР}}$ показаны сплошными линиями синего и красного цветов, эти же границы без учета $2\beta_{\text{ЗР}}$ показаны штриховыми линиями.

Расстояния $L_{\text{ЗВЛ O } \beta}$ и $L_{\text{ЗВЛ П } \beta}$ в соответствии с рисунком 3.8 находим по формулам: $L_{\text{ЗВЛ O } \beta} = L_{\text{max O}} - l_{\text{min O}} \cos \beta_{\text{ЗР}}$; $L_{\text{ЗВЛ П } \beta} = L_{\text{max П}} - l_{\text{min П}} \cos \beta_{\text{ЗР}}$. Принимая $\beta_{\text{ЗР}} = 60$ угл. град ($2\beta_{\text{ЗР}} = 120$ угл. град) и используя полученные выше значения параметров, получаем $L_{\text{ЗВЛ O } \beta} = 7,6$ км; $L_{\text{ЗВЛ П } \beta} = 6,3$ км.

Поперечные размеры ЗВЛ О $l_{\text{ЗВЛ O } \beta}$ и ЗВЛ П $l_{\text{ЗВЛ П } \beta}$ с учетом угла поля зрения $2\beta_{\text{ЗР}}$ вычисляем по формулам $l_{\text{ЗВЛ O } \beta} = l_{\text{min O}} \sin \beta_{\text{ЗР}}$; $l_{\text{ЗВЛ П } \beta} = l_{\text{min П}} \sin \beta_{\text{ЗР}}$. Принимая $\beta_{\text{ЗР}} = 60$ угл. град и используя полученные выше значения параметров, получаем $l_{\text{ЗВЛ O } \beta} = 1040$ м; $l_{\text{ЗВЛ П } \beta} = 870$ м.

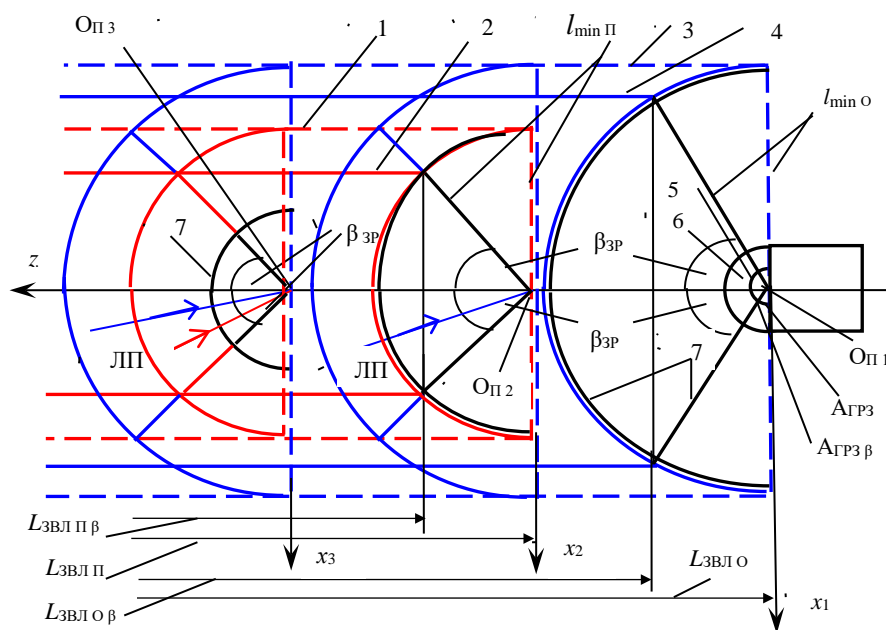


Рисунок 3.7 – Схема оценки параметров зон лазерной опасности для ВС с учетом полного угла поля зрения $2\beta_{зр}$ пилота в горизонтальной проекции на плоскость ZO_KX : 1 – граница ЗВЛ П без учета угла $2\beta_{зр}$; 2 – граница ЗВЛ П с учетом угла $2\beta_{зр}$; 3 – граница ЗВЛ О без учета угла $2\beta_{зр}$; 4 – граница ЗВЛ О с учетом угла $2\beta_{зр}$; 5 – ГЗГ; 6 – кабина пилота; 7 – граница мертвой зоны

3.2.4 Выводы и предложения по результатам расчетов ПЗЛО ВС

1. Из окончательных результатов, полученных выше, следует, что для ВС с верхним остеклением кабины пилота расстояние от края ВПП до границы зоны вероятного ослепления пилота составляет 7,6 км, а расстояние от края ВПП до границы зоны вероятного поражения сетчатки глаза пилота составляет 6,3 км. Поперечные размеры этих зон, отсчитываемые от оси ВПП, составляют 1040 м и 870 м, соответственно. Обобщая оба вида неблагоприятного воздействия (временное ослепление и поражение сетчатки глаза) и округляя полученные результаты, принимаем, что **расстояние $L_{звл}$ от края ВПП до границы зоны вероятного неблагоприятного воздействия на гражданское ВС излучением наземного ЛИЗ, угрожающего безопасности полетов, равно 8 км, а поперечные размеры зоны $l_{звл}$ равны 1 км в каждую сторону от оси ВПП.**

2. В п. 3.2.2 получено, что минимальная высота полета идущего на посадку ВС, при которой возникает угроза временного ослепления пилота, равна 410 м, а минимальная высота, при которой возникает угроза поражения сетчатки глаза пилота равна 340 м. Обобщая оба вида неблагоприятного воздействия и вводя некоторый коэффициент запаса по безопасности, следует принять, что **минимальная высота полета гражданского ВС, при которой возникает лазерная угроза безопасности полета, $H_{\text{пmin}}$ равна 500 м.**

3. В целях обеспечения лазерной безопасности полетов можно предложить следующие наземные организационно-технические мероприятия (ОРТМ):

- организовать усиленный специальный контроль (в том числе с использованием средств видеонаблюдения) площади, находящейся внутри прямоугольника со сторонами 8 на 2 км, примыкающего к краю ВПП, с целью выявления возможных источников лазерной угрозы (например, мест сосредоточения групп молодежи, использующих для развлечения световые эффекты и т. п.);

- обеспечить как можно более широкое ограждение участка территории примыкающей к краю ВПП, не допускающее проникновение посторонних лиц.

4. Предлагается осуществить следующие ОРТМ на борту воздушных судов:

- установить специальные сигнальные устройств в кабинах пилотов, предупреждающие экипаж о вхождении в зону возможной лазерной угрозы, при достижении высоты полета 500 м; при этом целесообразно использовать световое табло, высвечивающее знак лазерной опасности по ГОСТ ИЕС-1 (рисунок 3.8);



Рисунок 3.8 – Знак «Опасность, лазерное излучение»

- установить в передней области смотрового окна кабины пилота по обе стороны от оси два **пороговых лазерных дозиметра** (ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 [34]) с суммарным углом поля зрения 120 угл. град., выдающих звуковой сигнал при попадании в их входной зрачок лазерного пучка с мощностью, превышающей ПДУ по критерию ослепления.

Естественно, информация о срабатывании дозиметра должна передаваться на диспетчерский пункт, что даст возможность определить сектор расположения источника излучения и принять различные оперативные меры по пресечению дальнейшей работы источника несанкционированного облучения ВС.

Многие эксперты в последние годы предлагают снабжать пилотов очками для защиты от лазерного излучения, что, в общем-то, совсем неплохо, но требует дополнительных затрат при их массовом применении. Кроме того любые очки всегда будут создавать определенные неудобства пилотам в самый ответственный момент их работы, связанный с выполнением операций по посадке ВС. Вопрос о применении пилотами авиалайнеров специальных очков может приобрести актуальность в будущем лишь в случае существенного нарастания числа случаев «лазерного хулиганства» в ближних зонах, прилегающих к ВПП, а также в случае неэффективности или невыполнения предложенных выше ОРТМ.

3.2.5 Примеры оценки степени реальной лазерной угрозы безопасности полетов ВС

В 2014 и 2015 гг. неоднократно отмечались случаи «лазерного хулиганства» в отношении ВС. Рассмотрим в качестве примера четыре случая несанкционированного воздействия лазером (НВЛ) на воздушные суда (НВЛ ВС), произошедших в 2014 г. Данные об этих инцидентах приведены в таблице 3.2.

Т а б л и ц а 3.2. Данные экспертной оценки степени лазерной угрозы полету ВС

№	Дата инцидента НВЛ ВС (Дата опубликования)	Тип ВС, маршрут полета, фаза полета*	$H_{П}$ (м)*, $L_{П}$ (км)*. Местоположение ЛУК* $L_{Лиз}^{**}$ (км), $l_{Лиз}^{**}$ (м)	Результаты сравнения $H_{П}$, $L_{П}$, $L_{Лиз}$, $l_{Лиз}$ с ПЗЛО ВС. Заключение о точках нахождения ВС и ЛИЗ по отношению к ЗВЛ	Предварительный вывод об угрозе для пилота ВС	Окончательное заключение об угрозе для пилота ВС
1	05.03.2014 (06.03.2014)	Боинг-737-500, Москва-Уфа, посадка	Село Нижегородка, $H_{П} = 400$ м $L_{П} = 2,5$ км, $L_{Лиз} = 3,7$ км, $l_{Лиз} = 800$ м	$H_{П} < H_{Пmin}$ (500 м), $L_{П} < L_{Звл}$ (8 км), $L_{П} < L_{Звл П}$ (6,3 км) $L_{Лиз} < L_{Звл}$ (8 км), $l_{Лиз} < l_{Звл}$ (1 км). Точка полета ВС находится внутри ЗВЛ. Точка местоположения ЛИЗ находится внутри ЗВЛ (ЗВЛ П)	Вероятна опасность ослепления и поражения глаз	Реальной угрозы в точке инцидента <i>не возникло</i> *** В точках глиссады на расстояниях от 4,2 до 4,5 км от ВПП существует опасность <i>ослепления</i> пилота***
2	15.04.2014	CRJ-100, Москва-Саранск, посадка	Пос. Луховка, $L_{Лиз} = 2,3$ км, $l_{Лиз} = 280$ м	$L_{Лиз} < L_{Звл}$ (8 км), $L_{Лиз} < L_{Звл П}$ (6,3 км), $l_{Лиз} < l_{Звл}$ (1 км). Точка полета ВС находится внутри ЗВЛ. Точка местоположения ЛИЗ находится внутри ЗВЛ	Вероятна опасность ослепления и поражения глаз	В точках глиссады на расстояниях от 2,5 до 3,5 км от ВПП существует опасность <i>ослепления</i> пилота***
3	26.04.2014 (30.04.2014)	Челенджер 604, Карловы Вары – Казань, посадка	Нас. пункт Тетеево, Лаишевский р-н, $L_{Лиз} = 38$ км	$L_{Лиз} \gg 8$ км. Точка местоположения ЛИЗ находится вне ЗВЛ	Безопасно	Безопасно
4	18.05.2014	А-319, Москва-Ростов-на-Дону, посадка	Театральная площадь г. Ростова, $L_{Лиз} = 5,3$ км, $l_{Лиз} = 800$ м	$L_{Лиз} < L_{Звл}$ (8 км), $L_{Лиз} < L_{Звл П}$ (6,3 км), $l_{Лиз} < l_{Звл}$ (1 км). Точка полета ВС находится внутри ЗВЛ. Точка местоположения ЛИЗ находится внутри ЗВЛ	Вероятна опасность ослепления и поражения глаз	В точках глиссады на расстояниях от 5,7 до 6 км от ВПП существует опасность <i>ослепления</i> пилота***

* Данные из источника информации

** Значения параметра получено путем использования картографических данных

*** Заключение получено путем дополнительных расчетов

В таблице 3.2 приведены сведения о высоте полета H_{Π} (м) и дальности удаления ВС от края ВПП L_{Π} (км), указанные в источниках информации, а также оценки расстояний $L_{\text{ЛИЗ}}$ (км) от предполагаемого местонахождения ЛИЗ (ЛУК) до края ВПП и оценки расстояний $l_{\text{ЛИЗ}}$ (м) от предполагаемого местонахождения ЛИЗ до оси ВПП, проведенные с применением картографических данных (рисунок 3.9). Кроме того в таблице 3.2 приведены результаты сравнений указанных параметров со значениями ПЗЛО ВС, указанными в п. 3.2.4, и заключение о местоположении источника ЛИ по отношению к границе ЗВЛ.

Инциденты, для которых получено заключение о местонахождении ВС и ЛИЗ в пределах ЗВЛ, необходимо подвергать дополнительному экспертному анализу с целью уточнения наличия или отсутствия угрожающей ситуации. Для более точной оценки степени угрозы применяем следующие критерии угрозы:

$$Z \leq Z_{\text{ЛОЗ}} \text{ или } Z_{\text{ЛОЗ}} < Z \leq Z_{\text{ЗОС}}; \alpha_{\text{ЛП}} \leq \alpha_{\text{мин}}; \beta \leq \beta_{\text{ЗР}}, \quad (3.18)$$

где Z (м) – расстояние от предполагаемой точки нахождения ЛИЗ (т. 1, рисунок 3.9) до предполагаемой точки полета O_{Π} во время облучения;

$\alpha_{\text{ЛП}}$ (угл. град., рад.) – угол наклона оси лазерного пучка к ПЗП (угол цели);

β (угл. град., рад.) – угол между проекцией оси лазерного пучка на ПЗП и проекцией глиссады на ПЗП.



Рисунок 3.9 – Схема определения по карте параметров $L_{\text{ЛИЗ}}$, $l_{\text{ЛИЗ}}$ для случая НВЛ ВС вблизи аэропорта «Уфа» (инцидент № 1 по таблице 3.2)

Для оценки параметров Z , $\alpha_{\text{ЛП}}$, β используем схему, приведенную на рисунке 3.10. В схеме (рисунок 3.10) для упрощения предполагаем, что точка касания $O_{\text{К}}$ находится на краю ВПП. Для нахождения Z используем систему уравнений:

$$Z = (H_{\Pi}^2 + Z_{\text{ПЗП}}^2)^{1/2}; Z_{\text{ПЗП}} = (\Delta L^2 + l_{\text{ЛИЗ}}^2)^{1/2}; \Delta L = L_{\Pi} - (L_{\text{ЛИЗ}}^2 - l_{\text{ЛИЗ}}^2)^{1/2}. \quad (3.19)$$

Будем использовать критерии (3.18) для $\alpha_{\text{ЛП}}$ и β в следующем виде:

$$\alpha_{\text{ЛП}} \leq 0,35 \text{ (20 угл. град);}$$

$$\alpha_{\text{ЛП}} = \arccos (Z_{\text{ПЗП}} / Z) \text{ (рад);}$$

$$\beta \leq 1,05 \text{ (60 угл. град); } \beta = \arctg (l_{\text{ЛИЗ}} / \Delta L) \text{ (рад).}$$

В соответствии с предварительными заключениями, приведенными в 6-ом столбце

таблицы 3.2, необходимо подвергнуть дополнительному экспертному анализу инциденты №№ 1, 2, 4.

Инцидент № 1 (аэропорт г. Уфа). Подставляя в уравнение для ΔL (3.19) значения параметров $L_{\text{лиз}}$ и $l_{\text{изл}}$, приведенные в таблице 3.2 для инцидента № 1, получаем: $L = -1100$ м. Отрицательное значение ΔL говорит о том, что точка 2 (рисунок 3.10) лежит дальше точки $O_{\text{п}}$. В свою очередь это означает, что лазерный пучок, исходящий из точки 1,

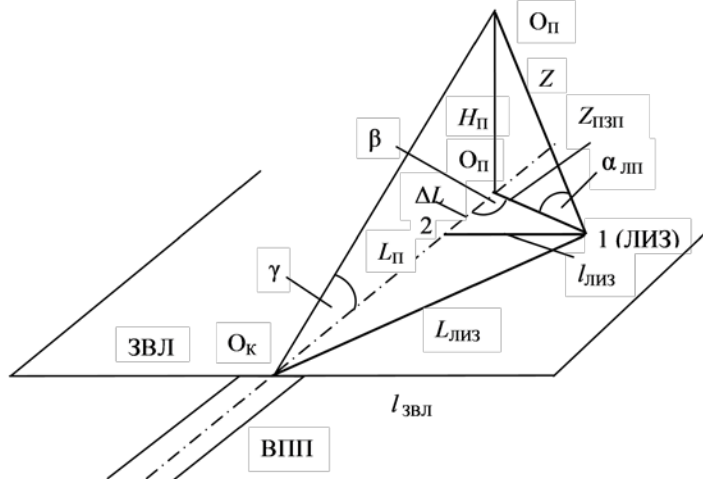


Рисунок 3.10 – Схема определения расстояния Z от точки полета $O_{\text{п}}$ до точки 1 местоположения ЛИЗ и определения углов $\alpha_{\text{лп}}$ и β

был направлен на ВС по схеме «вверх, сбоку и сзади», т.е. вдогонку пролетевшему самолету. Такой пучок *никак не мог попасть на рабочее место пилота, т.е. реальной угрозы полету не возникло.*

Однако вызывает сомнение достоверность данных о параметрах $H_{\text{п}}$ и $L_{\text{п}}$. Если считать достоверным значение $L_{\text{п}} = 2,5$ км, то при стандартном угле глиссады $\gamma \approx 3$ угл. град = $0,05$ рад получаем $H_{\text{п}} \approx 0,05L_{\text{п}} = 125$ м, в то время как в источнике информации утверждается, что высота полета была 400 м. Если принять, что значение $H_{\text{п}} = 400$ м является достоверным, получаем $L_{\text{п}} = 20H_{\text{п}} = 8$ км (а не $2,5$ км, как указано в источнике информации). Если считать, что $L_{\text{п}} = 8$ км, получаем, что лазерный пучок направлялся в переднем секторе обзора и мог попасть в кабину пилота. Действительно, имеем $\beta = 0,18 (< 1,05) = 10$ угл. град., $Z = 4400$ м ($Z > Z_{\text{зос}} = 1200$ м).

Как видим, при принятом допущении ВС находилось вблизи края ЗВЛ, однако угроза безопасности полета по причине возможного ослепления пилота не возникла. Общий вывод экспертизы, основанный на данных, приведенных в интернете, свидетельствует, что в инциденте № 1 *реальной угрозы полету не возникло.* Однако это не означает, что такой угрозы не существует в других точках полета, расположенных ближе к ВПП. Легко определить ближнюю к ВПП границу зоны расстояний $L_{\text{п}}$, ближе которой пучок ЛИ, направленный из т. 1, будет находиться уже вне поля зрения пилота. Принимая $\beta = \beta_{\text{зр}} = 60$ угл. град, получаем $L_{\text{п}} = 4,2$ км. Для точки полета, находящейся на расстоянии $L_{\text{п}2}$, в которой при снижении ВС уже выполняются условия $Z = Z_{\text{зос}} = 1200$ м, получаем $L_{\text{п}2} = 4,5$ км. Таким образом, вблизи села Нижегородка имеется участок глиссады, уязвимый для пучка ЛИ, направленного с ПЗП. Этот участок расположен между точками полета, находящимися на расстояниях от $4,2$ до $4,5$ км от края ВПП.

Инцидент № 2 (аэропорт г. Саранска). В данном случае эксперт не располагает данными о значениях H_{Π} и L_{Π} и поэтому нельзя сделать вывод о конкретной степени угрозы, возникшей в момент инцидента. Применяв изложенный выше способ вычислений расстояний $L_{\Pi 1}$, $L_{\Pi 2}$, получаем $L_{\Pi 1} = 2,4$ км, $L_{\Pi 2} = 3,4$ км. Таким образом, можно лишь утверждать, что вблизи поселка Луховка имеется участок глиссады, уязвимый для лазерного пучка, направленного с ПЗП. Этот участок расположен между точками полета, находящимися на расстояниях от 2,4 до 3,4 км от края ВПП. Для более точной оценки степени возможной угрозы следует вычислить коэффициенты $R_{\text{сол}}$, $R_{\text{осл}}$ для точки полета, находящейся на расстоянии $L_{\Pi 1}$ от края ВПП. Решая систему уравнений (3.19) для этой точки получаем $Z = 930$ м. По формулам, приведенным в параграфах 2.5 и 3.1, получаем $R_{\text{сол}} = 1,1$ ($\lambda = 445$ нм, $P = 1$ Вт, $\Theta = 10^{-3}$ рад), $R_{\text{осл}} = 1,4$ ($\lambda = 532$ нм, $P = 0,5$ Вт, $\Theta = 10^{-3}$ рад). Таким образом, в точке полета, находящейся на расстоянии $L_{\Pi 1}$ от края ВПП, **возможно кратковременное ослепление пилота ВС.**

Инцидент № 3 (аэропорт г. Ростова-на-Дону). Ситуация в рассматриваемом инциденте аналогична предыдущей. Соответствующие значения границ опасного участка: $L_{\Pi 1} = 5,7$ км, $L_{\Pi 2} = 6$ км. Значения коэффициентов $R_{\text{сол}}$ и $R_{\text{осл}}$ примерно равны значениям, приведенным выше, т.е., как и в предыдущем случае, в точке полета, находящейся на расстоянии $L_{\Pi 1}$ от края ВПП, **возможно кратковременное ослепление пилота ВС.**

Приведенные примеры показывают, что нахождение ВС и ЛИЗ в пределах ЗВЛ еще не может служить основанием для окончательного вывода о реальности возникшей лазерной угрозы полету. Для окончательного вывода необходимо знать конкретные численные значения параметров H_{Π} и L_{Π} а также достаточно достоверные значения параметров $L_{\text{лиз}}$ и $l_{\text{лиз}}$. Если получение информации о значениях H_{Π} и L_{Π} не представляет каких-либо сложностей, то задача получения информации о более-менее точных значениях параметров $L_{\text{лиз}}$ и $l_{\text{лиз}}$, и о характеристиках использованного ЛИЗ, вызывает определенные затруднения. Ее решение целиком ложится на работников службы обеспечения безопасности полетов наряду с представителями органов охраны общественного порядка.

В заключение заметим, что приведенные выше методики оценки степени реальной лазерной угрозы безопасности полетов могут послужить действенным инструментом при определении юридической ответственности для «лазерных хулиганов», поскольку, возникновение реальной угрозы от НВЛ ВС является основанием для привлечения правонарушителей к уголовной ответственности по статье 267.1 УК РФ «Действия, угрожающие безопасной эксплуатации транспортных средств». Следует добавить, что для любого из рассмотренных выше инцидентов НВЛ ВС имеются основания для привлечения лиц, направлявших лазерные пучки в сторону самолетов, к административной

ответственности по ст. 11.4 Кодекса РФ об административных правонарушениях «Нарушение правил использования воздушного пространства». Дело в том, что в 2012 г. в Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации [97] введен пункт 56.1 «Применение лазеров и изделий на основе лазеров в направлении осуществляющих руление, взлет, посадку и полет воздушных судов запрещается».

3.3 Результаты и выводы по материалам главы 3

1. Установлены значения порогов ослепления лазерным излучением на наиболее опасных для глаз «зеленой» и «синей» длинах волн: $P_{\text{осл } 532} = 0,039 \text{ мВт} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$ на длине волны 532 нм; $P_{\text{осл } 455} = 0,076 \text{ мВт} = 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$ на длине волны 455 нм.

2. По результатам вычислений коэффициентов ослепления лазерным пучком и расстояний до границ зон ослепления можно сделать следующие выводы:

- любые лазерные указки и любые лазерные изделия гражданского назначения с мощностью излучения $P \geq 0,04 \text{ мВт}$ представляют опасность ослепления водителей автомобильного транспорта и членов локомотивных бригад;

- любые лазерные указки с мощностью излучения $P \geq 5 \text{ мВт}$ представляют опасность ослепления пилотов воздушных судов, осуществляющих взлет или посадку.

3. По результатам вычислений параметров зон лазерной опасности для воздушного судна можно сделать следующие выводы:

- расстояние от края ВПП до границы зоны вероятного неблагоприятного воздействия на гражданское ВС излучением наземного ЛИЗ, угрожающего безопасности полетов, равно 8 км, а поперечные размеры этой зоны равны 1 км в каждую сторону от оси ВПП;

- минимальная высота полета гражданского ВС с верхним остеклением кабины пилота, при которой возникает лазерная угроза безопасности полета, равна 500 м.

4. По материалам § 3.1 соискателем в соавторстве с Б. Н. Рахмановым опубликована статья в журнале «Безопасность жизнедеятельности. Приложение» [92], а по материалам § 3.2 – статья в журнале «Мир транспорта» [98].

ГЛАВА 4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ДОЗИМЕТРИИ

4.1 Теоретические основы разработки лазерных дозиметров

4.1.1 Общие требования к дозиметрам лазерного излучения

Для наиболее точной оценки СОЛ наряду с методами расчетной лазерной дозиметрии следует использовать методы инструментальной ЛДОЗ. Действительно, теоретические методики основаны на значительных допущениях в моделях полей ЛИ. Как бы мы не пытались приблизить модели лазерных полей к реально существующей структуре поля, мы не можем учесть все тонкости формирования этой структуры. Наиболее достоверную информацию о характеристиках лазерного поля в требуемой точке пространства можно получить только путем измерений. В последнем случае речь идет о дозиметрическом контроле лазерного излучения (ДК ЛИ). Сущность ДК ЛИ заключается в измерении энергетических параметров лазерного излучения в заданной точке пространства и сравнении полученных значений ЭП ЛИ со значениями соответствующих ПДУ, регламентированными в СН 5804 [17] и СанПин [18].

Различаем две формы ДК ЛИ: предупредительный и индивидуальный ДК ЛИ.

Предупредительный дозиметрический контроль лазерного излучения – это ДК ЛИ, проводимый методом измерений наибольших значений ЭП ЛИ на рабочем месте оператора лазерной установки.

Индивидуальный дозиметрический контроль лазерного излучения – это ДК ЛИ, проводимый методом измерений значений ЭП ЛИ, попадающего непосредственно на органы тела человека в процессе его контакта с лазерным излучением.

В соответствии с приведенным выше разделением форм дозиметрического контроля следует различать два вида лазерных дозиметров (далее дозиметров, ЛД):

- **лазерные дозиметры предупредительного контроля**, предназначенные для размещения в заданных точках пространства и проведения измерений вне зависимости от нахождения в данной точке человека, для которого проводится оценка СОЛ;

- **лазерные дозиметры индивидуального контроля**, предназначенные для размещения и измерения ЭП ЛИ непосредственно на поверхности тела человека.

Кроме того ЛД можно разделить на следующие виды по способу получения информации о контролируемом ЛИ:

- **показывающие лазерные дозиметры** – ЛД, имеющие стрелочные или цифровые устройства индикации, по показаниям которых определяют значения ЭП ЛИ;

- **показывающие лазерные дозиметры с пороговым устройством** – ЛД, имеющие как устройства индикации, так и пороговые устройства сигнализации, выдающие сигнал опасности в случае, если значение ЭП ЛИ превышает или равно значению ПДУ;

- **пороговые лазерные дозиметры** – ЛД без устройства индикации, имеющие только пороговые устройства сигнализации.

Установим требования к спектральным, временным и частотным диапазонам работы ЛД, а также к диапазонам измерения ЭП ЛИ с учетом значений ПДУ, регламентированных в СН [17] и СанПин [18]. В соответствии с СН и СанПин ЛД должны измерять параметры ЛИ в спектральных диапазонах:

- от 200 до 380 нм (от 0,20 до 0,38 мкм) – спектральный диапазон 1;
- от 380 до 1400 нм (от 0,38 до 1,40 мкм) – спектральный диапазон 2;
- от 1400 до 10^5 нм (от 1,40 до 100 мкм) – спектральный диапазон 3.

Далее автор не рассматривает требования к ЛД для работы в спектральном диапазоне 1, поскольку ЛИЗ, генерирующие ЛИ в этом диапазоне, не нашли применения в транспортной отрасли и не используются на открытых пространствах, где возможно создание угрозы безопасности эксплуатации транспортных средств.

Учитывая все возможные режимы генерации контролируемого ЛИ: НЕПР ЛИ, ИМП ЛИ, ИМ ЛИ а также ЛИ в виде серий импульсов (ИМПС ЛИ) требуется, чтобы ЛД измеряли все энергетические параметры лазерного излучения, указанные в таблице 4.1.

Анализ современного парка лазерных технологических установок и парка ЛИЗ, работающих на ОНР, приводит к выводу, что лазерные дозиметры должны иметь следующий обязательный набор рабочих длин волн ЛИ, на которых ЛД должны обеспечивать прямые измерения ЭП ЛИ: 445, 532; 635; 910; 1064, 1070; 1540 нм; 10,6 мкм. Естественно, желательно, чтобы лазерный дозиметр имел дополнительно как можно больше рабочих длин волн в указанных выше спектральных диапазонах.

Наименьшее измеряемое значение ЭП ЛИ в каждом спектральном диапазоне должно быть в 10 раз меньше ПДУ_{ХР} по СН и СанПин, а наибольшее измеряемое значение должно быть в 10 раз больше ПДУ для кожи при однократном действии ЛИ. Указанные наименьшее и наибольшее измеряемые значения определяют нижний и верхний пределы измерений ЛД, ограничивающие диапазон измерений ЛД. Требуемые диапазоны измерений ЛД в спектральных диапазонах 2 и 3 приведены в таблице 4.2.

ЛД должны иметь пределы допускаемых основных относительных погрешностей, не превышающие абсолютных значений, приведенных в таблице 4.2.

контроля

Полное наименование энергетического параметра ЛИ	Сокращенное наименование параметра	Условное обозначение, размерность
1. Энергетическая экспозиция от импульса ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ, прошедшего через ограничивающую апертуру	Импульсная энергетическая экспозиция	$H_{и}$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}$
2. Энергетическая экспозиция от серии импульсов ЛИ*	Энергетическая экспозиция от серии импульсов	$H_{си}$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}$
3. Максимальная за время контроля энергетическая экспозиция от импульса ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Максимальная импульсная энергетическая экспозиция	$H_{и \max}$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}$
4. Суммарная за время контроля энергетическая экспозиция от ИМП ЛИ, ИМ ЛИ, и ИМПС ЛИ*	Суммарная импульсная энергетическая экспозиция	$H_{\Sigma \text{им}}$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}$
5. Энергия импульса ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Энергия импульса	$W_{и}$, Дж
6. Энергия серии импульсов ИМПС ЛИ*	Энергия серии импульсов	$W_{си}$, Дж
7. Максимальная за время контроля энергия импульса ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Максимальная энергия импульса	$W_{и \max}$, Дж
8. Суммарная за время контроля энергия импульсов ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Суммарная энергия импульсного ЛИ	$W_{\Sigma \text{им}}$, Дж
9. Облученность от непрерывного лазерного излучения*	Облученность от НЕПР ЛИ	E , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$
10. Максимальная за время контроля облученность от непрерывного лазерного излучения*	Максимальная облученность от НЕПР ЛИ	E_{\max} , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$
11. Средняя облученность от ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Облученность от ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ	$E_{\text{им}}$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$
12. Максимальная за время контроля средняя облученность от ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Максимальная облученность от ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ	$E_{\text{им} \max}$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}$
13. Мощность непрерывного ЛИ, прошедшего через ограничивающую апертуру	Мощность НЕПР ЛИ	P , Вт
14. Максимальная за время контроля мощность непрерывного ЛИ*	Максимальная мощность непрерывного ЛИ	P_{\max} , Вт
15. Средняя мощность импульсно-модулированного ЛИ и ЛИ в виде серий импульсов*	Средняя мощность ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ	$P_{\text{им}}$, Вт
16. Максимальная за время контроля средняя мощность ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ*	Максимальная мощность ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ	$P_{\text{им} \max}$, Вт
17. Суммарная за время контроля энергетическая экспозиция от непрерывного ЛИ*	Суммарная энергетическая экспозиция от НЕПР ЛИ	$H_{\Sigma \text{нп}}$, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$
18. Суммарная за время контроля энергия непрерывного ЛИ*	Суммарная энергия НЕПР ЛИ	$W_{\Sigma \text{нп}}$, Дж

* прошедшего через ограничивающую апертуру

Лазерные дозиметры в общем случае должны также измерять следующие временные и частотные параметры ЛИ:

- длительность воздействия непрерывного лазерного излучения, $t_{в \text{ нп}}$ (с);
- длительность воздействия ИМ ЛИ, $t_{в \text{ им}}$ (с);
- количество импульсов ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ, $N_{и}$ (имп);
- частоту повторения импульсов ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ, $F_{и}$ (Гц).

Т а б л и ц а 4.2 – Диапазоны измерений и пределы допускаемых основных относительных

погрешностей лазерных дозиметров: $\delta_H, \delta_W, \delta_E, \delta_P, \delta_{H\Sigma}, \delta_{W\Sigma}$

Спектральный диапазон, мкм	Рабочая длина волны, мкм	Диапазон измерений $H_{и}, H_{си}, H_{и\max};$ $W_{и}, W_{си}, W_{и\max}$	$\delta_H,$ $\delta_W,$ %	Диапазон измерений $E, E_{\max}, E_{им},$ $E_{им\max};$ $P, P_{\max}, P_{им},$ $P_{им\max}$	$\delta_E,$ $\delta_P,$ %	Диапазон измерений $H_{\Sigma\text{ им}},$ $H_{\Sigma\text{ нп}},$ $W_{\Sigma\text{ им}},$ $W_{\Sigma\text{ нп}}$	$\delta_{H\Sigma},$ $\delta_{W\Sigma},$ %
0,38 – 1,40	0,445; 0,532; 0,650; 0,910; 1,064	$10^{-4} - 1 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ ($10^{-8} - 10^{-4} \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$); $10^{-8} - 10^{-4} \text{ Дж}$	\pm 25	$10^{-2} - 10^2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ($10^{-6} - 10^{-2} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$); $10^{-6} - 10^{-2} \text{ Вт}$	\pm 20	$10^{-4} - 10^3 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ ($10^{-8} - 10^{-1} \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$); $10^{-8} - 10^{-1} \text{ Дж}$	\pm 25
1,40 – 11,00	1,540; 10,600	$10 - 10^4 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ ($10^{-4} - 1 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$); $10^{-4} - 1 \text{ Дж}$	\pm 25	$10^2 - 10^4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ($10^{-6} - 10^{-2} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$); $10^{-6} - 10^{-2} \text{ Вт}$	\pm 25	$10 - 10^8 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ ($10^{-3} - 10^4 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$); $10^{-3} - 10^4 \text{ Дж}$	\pm 30

Диапазоны измерений временных и частотных параметров контролируемого ЛИ должны быть не менее: $t_{в\text{ нп}} = t_{в\text{ им}} = 10^{-1} - 10^5 \text{ с}$; $N_{и} = 1 - 200 \text{ имп}$; $F_{и} = 0 - 200 \text{ Гц}$.

Лазерные дозиметры должны измерять ЭП ЛИ, генерируемого в виде ИМП ЛИ, ИМ ЛИ и ИМПС ЛИ, в диапазонах длительностей импульсов лазерного излучения: $10^{-9} - 10^{-2} \text{ с}$ – в спектральном диапазоне 2; $10^{-6} - 10^{-2} \text{ с}$ – в спектральном диапазоне 3.

4.1.2 Обеспечение возможности работы лазерного дозиметра в широких диапазонах длительностей и частот повторения импульсов

Наибольшую трудность для разработчиков ЛД представляет требование обеспечить работу ЛД в широком диапазоне длительностей импульсов излучения наряду с достаточно высокой частотой повторения импульсов. При этом в соответствии с основными формулами для определения коэффициента степени опасности лазерного излучения (2.1) – (2.5) требуется обеспечить измерение максимальной импульсной энергетической экспозиции или максимальной энергии импульса излучения из последовательности импульсов, поступивших на вход ЛД за время контроля T_k . Это означает, что *схема ЛД должна преобразовывать в электрический сигнал энергию каждого импульса из последовательности*.

Для решения этой задачи предлагается *метод интегрирования с автосинхронизацией* (МИА). Наиболее простая структурная схема ЛД, реализующая МИА с привязкой к заднему фронту импульса приемника излучения (первичного измерительного преобразователя), приведена на рисунке 4.1а. На рисунке 4.1б приведены временные диаграммы напряжений на выходах блоков схемы. Схема работает следующим образом.

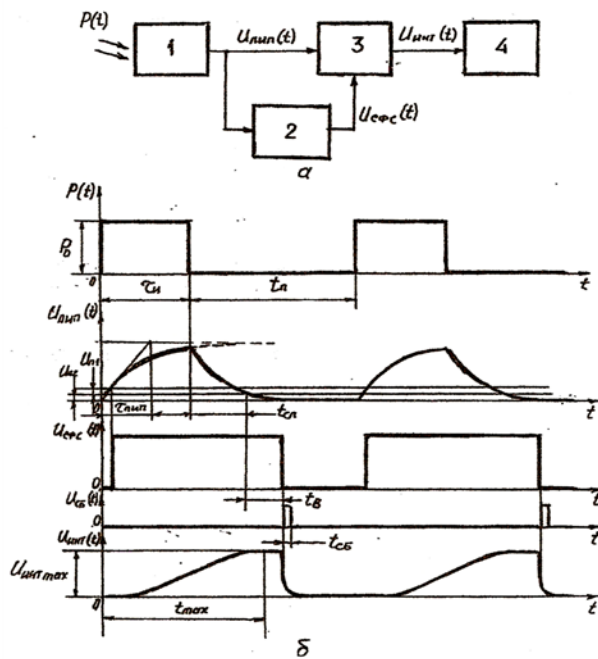


Рисунок 4.1 – Структурная схема лазерного дозиметра, реализующая МИА (а); временные диаграммы напряжений на выходах блоков схемы (б): 1 – первичный измерительный преобразователь (ПИП), 2 – схема формирования синхроимпульсов (СФС), 3 – интегратор (ИНТ), 4 – измеритель импульсных напряжений (ИИН)

(ИНТ) 3, на выходе которого формируются импульсы напряжения $U_{инт}(t)$ с амплитудой $U_{инт\ max}$ пропорциональной энергии импульса излучения $W_{и} = P_0 \tau_{и}$.

После окончания импульса излучения импульсы $U_{пип}(t)$ спадают с постоянной времени $\tau_{пип}$ и достигают некоторого другого порога срабатывания (порога отпускания) $U_{п2}$. Начиная с этого момента, СФС продолжает формировать импульс $U_{сфс}(t)$ еще в течение некоторого фиксированного интервала времени выдержки $t_{в}$, после чего на выходе СФС формируются короткие импульсы напряжения (импульсы сброса) $U_{сб}(t)$, длительностью $t_{сб}$. Импульсы $U_{сб}(t)$ поступают на ИНТ и сбрасывают напряжение на его выходе до нуля. После завершения процесса обработки сигнала ЛД готов к измерению энергии следующего импульса из последовательности. Интервал времени с момента окончания импульса излучения до момента окончания процесса преобразования в схеме ЛД назовем «мертвым временем» дозиметра $t_{м}$. Амплитуда импульсов $U_{инт\ max}$ измеряется аналоговым или цифровым измерителем импульсных напряжений (ИИН) 4, причем ИИН одновременно обеспечивает измерение наибольшей амплитуды импульсов за время контроля $T_{к}$. Для этого в ИИН используется аналоговый или цифровой пиковый детектор.

Результат измерений импульсной энергетической экспозиции (энергии) в требуемом диапазоне длительностей и частот повторения импульсов характеризуется погрешностью

Пусть на вход первичного измерительного преобразователя (ПИП) 1 поступает последовательность прямоугольных импульсов лазерного излучения с амплитудой P_0 (Вт) и длительностью $\tau_{и}$. ПИП в общем случае состоит из оптической системы, приемника излучения и нагрузочной $R_{н}C_{н}$ -цепи. На выходе ПИП формируются импульсы напряжения $U_{пип}(t)$, нарастающие с постоянной времени $\tau_{пип}$. Импульсы $U_{пип}(t)$ запускают схему формирования синхроимпульсов (СФС) 2 в момент достижения напряжением $U_{пип}(t)$ некоторого порога срабатывания $U_{п1}$. Одновременно импульсы $U_{пип}(t)$ поступают на импульсный интегратор

измерения. Основной составляющей этой погрешности является погрешность интегрирования $\delta_{\text{инт}}$, которая зависит от формы импульса излучения и от основных временных параметров схемы ЛД – постоянных времени ПИП $\tau_{\text{ПИП}}$ и ИНТ $\tau_{\text{ИНТ}}$.

Напряжение на выходе ИНТ выразим в операторной форме

$$U_{\text{ИНТ}}(p) = h_{\text{ПИП}}(p) h_{\text{ИНТ}}(p) P(p) S_{\text{ПИП}}, \quad (4.1)$$

где $h_{\text{ПИП}}(p)$, $h_{\text{ИНТ}}(p)$ – передаточные функции блоков ПИП и ИНТ;

$P(p)$ – операторное выражение функции $P(t)$, описывающей форму импульса;

$S_{\text{ПИП}}$ (В/Вт) – чувствительность ПИП по напряжению.

Рассмотрим вопрос преобразования импульсов излучения различной формы, встречающихся в практике использования лазеров. Прежде всего, рассмотрим лазерный импульс прямоугольной формы. Операторное выражение функции, описывающей такой импульс $P(p) = P_0/p$, где P_0 – максимальная мощность импульса. Тогда, полагая, что ПИП и ИНТ представляют собой аperiodические звенья первого порядка [38], получаем

$$U_{\text{ИНТ}}(p) = \frac{P_0 S_{\text{ПИП}} a b}{p(a+p)(b+p)}, \quad (4.2)$$

где $a = 1/\tau_{\text{ИНТ}}$, $b = 1/\tau_{\text{ПИП}}$.

Напряжение $U_{\text{ИНТ}}(t)$ изменяется по закону $U_{\text{ИНТ}}(t) = U_1(t) - U_2(t)$, где $U_1(t)$ – оригинал выражения (4.2); $U_2(t)$ – функция равная нулю при $t \leq \tau_{\text{и}}$ и равная $U_1(t - \tau_{\text{и}})$ при $t > \tau_{\text{и}}$. Тогда получаем

$$U_{\text{ИНТ}}(t) = \frac{S_{\text{ПИП}} P_0}{(\tau_{\text{ИНТ}} - \tau_{\text{ПИП}})} \left[\tau_{\text{ИНТ}} \left(e^{\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ИНТ}}} - 1 \right) e^{-t/\tau_{\text{ИНТ}}} - \tau_{\text{ПИП}} \left(e^{\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ПИП}}} - 1 \right) e^{-t/\tau_{\text{ПИП}}} \right]. \quad (4.3)$$

График функции (4.3) показан на нижней диаграмме рисунка 4.1б.

Найдем выражение времени t_{max} , по достижении которого амплитуда импульса на выходе интегратора достигает максимального значения $U_{\text{ИНТ max}}$. Из условия равенства нулю первой производной от функции (4.3) получаем

$$t_{\text{max}} = \frac{\tau_{\text{ИНТ}} \tau_{\text{ПИП}}}{\tau_{\text{ИНТ}} - \tau_{\text{ПИП}}} \ln \frac{e^{\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ПИП}}} - 1}{e^{\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ИНТ}}} - 1} \quad (4.4)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (4.3), и, учитывая, что для прямоугольного импульса излучения $P_0 = W_{\text{и}}/\tau_{\text{и}} = H_{\text{и}} S_{\text{ВХ}}/\tau_{\text{и}}$ (где $W_{\text{и}}$ – энергия импульса; $H_{\text{и}}$ – импульсная энергетическая экспозиция входного зрачка ПИП; $S_{\text{ВХ}}$ – площадь входного зрачка ПИП), получаем

$$U_{\text{ИНТ max}} = S_{\text{ПИП}} \frac{H_{\text{и}} S_{\text{ВХ}}}{\tau_{\text{ИНТ}}} \frac{\left(e^{\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ИНТ}}} - 1 \right)^{\frac{\tau_{\text{ИНТ}}}{\tau_{\text{ИНТ}} - \tau_{\text{ПИП}}}}}{\left(e^{\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ПИП}}} - 1 \right)^{\frac{\tau_{\text{ПИП}}}{\tau_{\text{ИНТ}} - \tau_{\text{ПИП}}}}}. \quad (4.5)$$

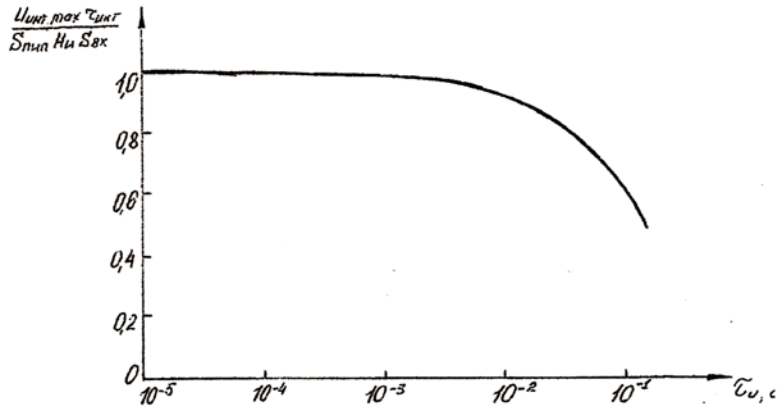


Рисунок 4.2 – График зависимости относительного значения максимальной амплитуды импульса напряжения на выходе интегратора ($U_{\text{инт max}} \tau_{\text{инт}} / (S_{\text{пип}} H_{\text{и}} S_{\text{вх}})$) от длительности импульса лазерного излучения $\tau_{\text{и}}$, построенный для $\tau_{\text{инт}} = 10^{-1}$ с, $\tau_{\text{пип}} \leq 10^{-3}$ с

График нормированной функции $U_{\text{инт max}} \tau_{\text{инт}} / S_{\text{пип}} H_{\text{и}} S_{\text{вх}}$ в зависимости от $\tau_{\text{и}}$ показан на рисунке 4.2.

График построен для следующих значений параметров: $\tau_{\text{инт}} = 10^{-1}$ с, $\tau_{\text{пип}} \leq 10^{-3}$ с. Эта функция в достаточно протяженной области длительностей

импульсов постоянна и практически равна единице. В этой области

$$U_{\text{инт max}} \tau = S_{\text{пип}} H_{\text{и}} S_{\text{вх}} \tau_{\text{инт}}^{-1}. \quad (4.6)$$

Рабочий диапазон длительностей импульсов рассматриваемой схемы должен находиться в области, где значения $U_{\text{инт max}}$ отличаются от значения $U_{\text{инт max}} \tau$ не более, чем на заданную величину абсолютной погрешности интегрирования $\Delta_{\text{инт}}$. При этом относительную погрешность интегрирования $\delta_{\text{инт}} = 100 \Delta_{\text{инт}} / U_{\text{инт max}} \tau$ (%), вызванную зависимостью результата измерений от длительности импульса, вычисляем по формуле

$$\delta_{\text{инт}} = 100 \frac{(e^{\eta} - 1)^{\frac{1}{1-\gamma}}}{\left(\frac{\eta}{e^{\gamma} - 1} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}} \eta^{-1}, \quad (4.7)$$

где $\eta = \tau_{\text{и}} / \tau_{\text{инт}}$, $\gamma = \tau_{\text{пип}} / \tau_{\text{инт}}$.

В практических схемах почти всегда выполняется условие $\tau_{\text{пип}} \ll \tau_{\text{инт}}$, поэтому можно считать, что в области «длинных» импульсов, где погрешность $\delta_{\text{инт}}$ имеет существенное значение, всегда выполняется условие $\gamma \ll \eta$. Тогда формулу (4.7) можно преобразовать к виду

$$\delta_{\text{инт}} = 100 [1 - \eta^{-1}(1 - e^{-\eta})]. \quad (4.8)$$

График функции (4.8) приведен на рисунке 4.3. Там же пунктирной линией построен график функции $\delta_{\text{инт}} = 50\eta$.

Как видно из рисунка 4.3 при значениях $\delta_{\text{инт}} < 3\%$ эти графики практически совпадают. Для обеспечения малой погрешности измерений, вызванной интегрированием, необходимо выполнение условия

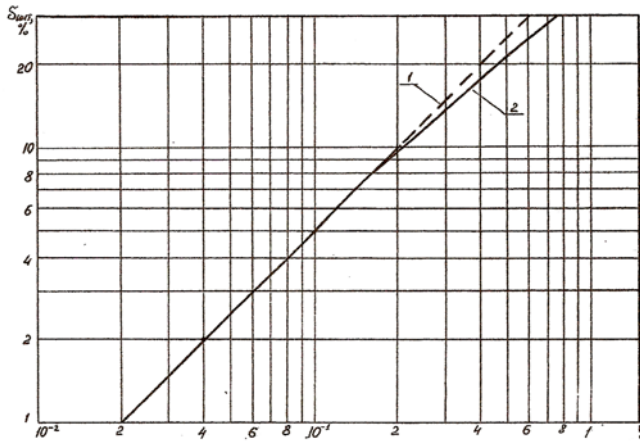


Рисунок 4.3 – Графики зависимости относительной погрешности интегрирования $\delta_{\text{инт}}$ от коэффициента относительной длительности импульса $\eta = \tau_{\text{и}} / \tau_{\text{инт}}$: 1 – график функции $\delta_{\text{инт}} = 50\eta$, 2 – график функции $\delta_{\text{инт}} = 100 [1 - \eta^{-1}(1 - e^{-\eta})]$

$$\tau_{\text{инт}} \geq 50 \tau_{\text{и max}} / \delta_{\text{инт}}. \quad (4.9)$$

Например, для $\delta_{\text{инт}} = 2\%$ нужно обеспечить $\tau_{\text{инт}} = 25\tau_{\text{и max}}$, т.е. $\eta_{\text{max}} = \tau_{\text{и max}} / \tau_{\text{инт}} = 0,04$ (при $\tau_{\text{и max}} = 10^{-2}$ с нужно обеспечить $\tau_{\text{инт}} = 2,5 \cdot 10^{-1}$ с).

В таблицах Приложения Ж приведены функции $U_{\text{инт}}(t)$, $U_{\text{инт}}(p)$, и формулы для вычисления погрешностей интегрирования для лазерного импульса с экспоненциальными фронтами, двухэкспоненциального лазерного

импульса, импульса ЛИ колоколообразной формы и серии коротких лазерных импульсов колоколообразной формы а также формулы для вычислений $\delta_{\text{инт}}$. Результаты вычислений $\delta_{\text{инт}}$ для импульсов различной формы показывают: наибольшие погрешности интегрирования возникают при преобразовании двухэкспоненциального импульса и импульса с экспоненциальными фронтами. В п. 4.1.1 за верхнюю границу требуемого диапазона длительностей импульсов ЛИ для ЛД принято значение 10^{-2} с. Импульсы ЛИ указанных двух форм, генерируемые реальными ЛИЗ, имеют значительно меньшие длительности. Можно утверждать: *если временные параметры схемы лазерного дозиметра, реализующей МИА, выбраны с учетом модели преобразования прямоугольного импульса, не возникнет дополнительной погрешности при преобразовании реальных импульсов другой формы.*

Рассмотрим возможность обеспечить работу ЛД в широком диапазоне длительностей импульсов излучения с достаточно высокой частотой их повторения, исходя из требования обеспечения наименьшего мертвого времени преобразования дозиметра. Для раздельного измерения энергии (энергетической экспозиции) каждого импульса ЛИ из последовательности необходимо, чтобы выполнялось условие

$$t_{\text{M}} \leq k t_{\text{П min}} = k (T_{\text{min}} - \tau_{\text{и max}}) = k (\theta_{\text{min}} - 1) (\theta_{\text{min}} F_{\text{max}})^{-1}, \quad (4.10)$$

где $t_{\text{П min}}$ – минимальное значение промежутка $t_{\text{П}}$ между двумя соседними импульсами;

k – коэффициент, показывающий какая часть общего мертвого времени ЛД приходится на схему преобразования, не включающую в себя блок 4 (см. рисунок 4.1а);

T_{min} – минимальный период следования импульсов;

$\tau_{и\ max} = T_{\min} / \theta_{\min}$ – наибольшая возможная длительность импульсов, следующих с периодом T_{\min} при заданной наименьшей скважности θ_{\min} ;

F_{\max} – максимальная частота следования импульсов.

Сброс напряжения $U_{\text{инт}}(t)$ должен производиться после того как оно достигнет максимального значения $U_{\text{инт\ max}}$ за время t_{\max} , т.е. должно выполняться еще одно условие $t_{\text{м}} \geq t_{\max} - \tau_{и}$. Для дальнейшего анализа заменим функцию (4.4) более простой функцией

$$t_{\max\ 1} = \tau_{и} + \tau_{\text{пип}} \ln \gamma^{-1}. \quad (4.11)$$

С учетом выражения (4.11) получаем условие

$$t_{\text{м}} \geq \tau_{\text{пип}} \ln \gamma^{-1}. \quad (4.12)$$

Из рисунка 4.1б видно, что $t_{\text{м}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{в}} + t_{\text{сб}}$, где $t_{\text{сп}}$ – время спада импульса $U_{\text{пип}}(t)$ до порога отпускания $U_{\text{п2}}$ блока 2. Время спада $t_{\text{сп}}$ можно вычислить по формуле

$$t_{\text{сп}} = \tau_{\text{пип}} \ln \frac{S_{\text{пип}} W_{и} (1 - e^{-\eta})}{l U_{\text{п1}} \tau_{и}}, \quad \text{где } l = U_{\text{п1}} / U_{\text{п2}}. \quad (4.13)$$

Напряжение $U_{\text{п1}}$ выбирается из условия надежного срабатывания блока 2 в случае минимальной амплитуды $U_{\text{пип\ min}}$ импульса $U_{\text{пип}}(t)$, т.е. когда $W_{и} = W_{и\ \min}$, $\tau_{и} = \tau_{и\ \max}$. При выполнении условия $\tau_{и\ \max} \gg \tau_{\text{пип}}$ получаем

$$U_{\text{п1}} = m S_{\text{пип}} W_{и\ \min} / \tau_{и\ \max}, \quad (4.14)$$

где m – коэффициент, показывающий какую часть минимального пикового значения $U_{\text{пип\ min}}$ составляет напряжение $U_{\text{п1}}$.

Условие (4.12) для выбора $t_{\text{м}}$ должно выполняться для случая, когда время спада имеет минимальное значение, т.е. $t_{\text{сп}} = t_{\text{сп\ min}}$. Это значение может быть вычислено по формуле (4.13) при условиях: $W_{и} = W_{и\ \min}$; $\tau_{и} = \tau_{и\ \max}$; $\tau_{и\ \max} \gg \tau_{\text{пип}}$. Тогда условие (4.12) преобразуется к виду

$$\tau_{\text{пип}} \ln (ml)^{-1} + t_{\text{в}} + t_{\text{сб}} \geq \tau_{\text{пип}} \ln (\tau_{\text{инт}} / \tau_{\text{пип}}). \quad (4.15)$$

Условие для выбора $t_{\text{м}}$, зависящее от частоты повторения импульсов, должно выполняться для случая, когда время спада имеет максимальное значение, т.е. $t_{\text{сп}} = t_{\text{сп\ max}}$. Это значение может быть вычислено по формуле (4.13) при условиях: $W_{и} = W_{и\ \max}$; $\tau_{и} = \tau_{и\ \min}$; $\tau_{и\ \min} \ll \tau_{\text{пип}}$. С учетом этих условий выражение (4.12) приводится к виду

$$\tau_{\text{пип}} \ln (D W_{и\ \max} / m l \tau_{\text{пип}}) + t_{\text{в}} + t_{\text{сб}} \leq k (\theta_{\min} - 1) (\theta_{\min} F_{\max})^{-1}, \quad (4.16)$$

где $D W_{и} = W_{и\ \max} / W_{и\ \min}$ – динамический диапазон ЛД в режиме измерений энергии импульсов излучения.

Применяя модель преобразования прямоугольного импульса излучения, выразим $\tau_{и\ max}$ через постоянную времени интегрирования $\tau_{инт}$ и погрешность интегрирования $\delta_{инт}$, используя формулу (4.8). Тогда из выражений (4.15), (4.16) получаем следующие формулы для расчета оптимальных значений временных параметров схемы ЛД, реализующей МИА:

$$\tau_{пип} \ln (10\tau_{инт} \sqrt{2D_w\delta_{инт}} / \tau_{пип}) = k (\theta_{\min} - 1) (2 \theta_{\min} F_{\max})^{-1}; \quad (4.17)$$

$$t_B + t_{CB} = \tau_{пип} \ln (m\tau_{инт} / \tau_{пип}). \quad (4.18)$$

4.1.3 Обеспечение широкого динамического диапазона лазерного дозиметра при использовании фотодиода в качестве приемника излучения

Результаты анализа работы схемы ЛД, реализующей МИА с привязкой к заднему фронту ПИП, показывают, что возможность работы схемы в заданном диапазоне энергии (энергетической экспозиции) обеспечивается, прежде всего, постоянной времени ПИП $\tau_{пип}$, выбор которой, в свою очередь, зависит от требуемого диапазона длительностей импульсов и наибольшей частоты их повторения.

Во всех разработанных в настоящее время ЛД для измерений в области спектра 380 – 1800 нм используются полупроводниковые фотодиоды. Определим наибольший динамический диапазон ЛД в режиме измерений энергии импульсов лазерного излучения для дозиметра, в котором в качестве приемника излучения используется фотодиод (ФД).

В соответствии с эквивалентной схемой ФД с нагрузочной $R_H C_H$ -цепочкой напряжение на цепочке в операторной форме описывается выражением [99].

$$U_H(p) = \frac{I_{ФД}(p)R_H ab}{(p+a)(p+b)}, \quad (4.19)$$

где $I_{ФД}(p)$ – функция, описывающая в операторной форме фототок, генерируемый фотодиодом при воздействии импульса излучения;

$$a = 1/\tau_{ЭКВ 1}; \quad b = 1/\tau_{ЭКВ 2};$$

$$\tau_{ЭКВ 1} = \frac{2R_H r C_H C_{ФД}}{R_H(C_H + C_{ФД}) + rC_{ФД} - \left\{ (R_H C_H - rC_{ФД})^2 + C_{ФД} R_H [C_{ФД} R_H + 2(R_H C_H + rC_{ФД})] \right\}^{1/2}}; \quad (4.20)$$

$$\tau_{ЭКВ 2} = \frac{2R_H r C_H C_{ФД}}{R_H(C_H + C_{ФД}) + rC_{ФД} + \left\{ (R_H C_H - rC_{ФД})^2 + C_{ФД} R_H [C_{ФД} R_H + 2(R_H C_H + rC_{ФД})] \right\}^{1/2}}; \quad (4.21)$$

r – прямое сопротивление фотодиода;

$C_{ФД}$ – емкость фотодиода.

Выражение для $I_{ФД}(p)$ можно получить, зная вид функции $I_{ФД}(t)$, характеризующей кинетику фототока при подаче на p - n переход ступеньки излучения мощностью P_0 . По

известной физической модели фототок p - n перехода при подаче на него ступеньки излучения изменяется по экспоненциальному закону

$$I_{\text{ФД}}(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau_0}), \quad (4.22)$$

где $I_0 = S_1 P_0$ – наибольший фототок в цепи ФД при подаче на него ступеньки излучения мощностью P_0 ;

S_1 (А/Вт) – чувствительность ФД;

τ_0 – собственная постоянная времени фотодиода, определяемая средним временем пролета неравновесных неосновных носителей заряда до p - n перехода.

Применяя функцию (4.22) в операторной форме, из выражения (4.19) получаем

$$U_{\text{Н}}(p) = P(p) S_1 R_{\text{Н}} \frac{abc}{(p+a)(p+b)(p+c)} = S_1 P_0 R_{\text{Н}} F(p), \quad (4.23)$$

где $F(p)$ – функция, описывающая форму импульса напряжения на $R_{\text{Н}}C_{\text{Н}}$ -цепочке; $c = 1/\tau_0$.

Рассмотрим случай преобразования фотодиодом импульса ЛИ прямоугольной формы с длительностью, соизмеримой с постоянными времени $\tau_{\text{ЭКВ} 1}$; $\tau_{\text{ЭКВ} 2}$; τ_0 . На рисунке 4.4 показано семейство вольтамперных характеристик фотодиода и временные диаграммы, поясняющие динамику изменения фототока и напряжения на нагрузочной цепи.

Предположим, что в исходном состоянии на фотодиод попадает излучение фона мощностью $P_{\text{Ф}}$, при этом режим работы ФД характеризуется рабочей точкой А на нагрузочной прямой KL, тангенс угла наклона которой к оси напряжений на ФД пропорционален $1/R_{\text{Н}}$.

При подаче на ФД импульса излучения прямоугольной формы мощностью P_0 фотодиод генерирует импульс фототока $I_{\text{ФД и}}(t)$, изменяющегося по экспоненциальному закону (4.22), как показано на правой временной диаграмме с координатами $I_{\text{ФД и}}(t)$, t . Одновременно возникает импульс напряжения $U_{\text{Н}}(t)$ на нагрузочной цепи, как показано на нижней временной диаграмме с координатами $U_{\text{Н}}(t)$, t . Верхний предел линейного преобразования мощности прямоугольного импульса P_{max} , будет определяться верхним пределом $I_{\text{пр}} = S_1 P_{\text{max}}$ фототока, генерируемого идеальным безинерционным ФД. Для реального ФД мощности P_{max} будет соответствовать максимальный импульсный фототок $I_{\text{ФД max}}$, который характеризуется рабочей точкой В, являющейся точкой пересечения линии MN, ограничивающей область линейной работы ФД, с нагрузочной прямой KL. Справа от линии MN лежит область линейной работы ФД, в которой обратное сопротивление $R_{\text{д}}$ фотодиода практически не зависит от напряжения, в то время, как в области, лежащей слева от линии MN, наблюдается существенное изменение $R_{\text{д}}$.

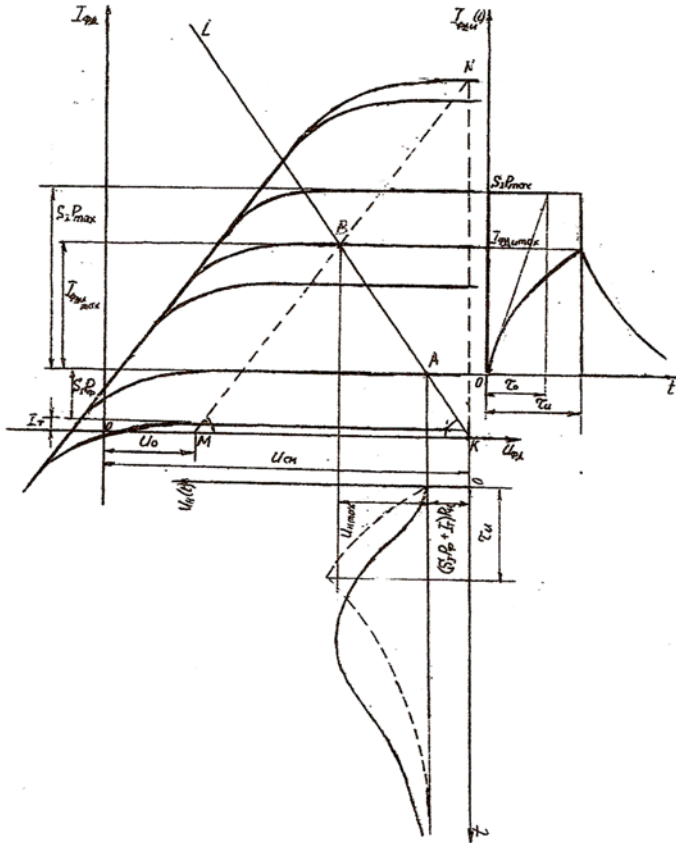


Рисунок 4.4 – Вольтамперные характеристики фотодиода и временные диаграммы импульсного тока фотодиода $I_{ФД}$ и (t) и напряжения на нагрузочной цепи $U_{Н}(t)$

Максимальный импульсный фототок $I_{ФД \max}$ в соответствии с формулой (4.22)

$$I_{ФД \max} = S_1 P_{\max} \left(1 - e^{-\tau_{и}/\tau_0} \right). \quad (4.24)$$

Импульс прямоугольной формы с максимальной мощностью P_{\max} в операторной форме описывается формулой $P(p) = P_{\max}/p$. По формуле (4.23) получаем

$$U_{Н \max}(t) = S_1 P_{\max} R_{Н} F_{\max}(t), \quad (4.25)$$

где $F_{\max}(t)$ – максимальное значение оригинала функции $F(p)$, имеющей вид

$$F(p) = \frac{abc}{p(p+a)(p+b)(p+c)}. \quad (4.26)$$

Из рисунка 4.4 следует

$$U_{Н \max}(\tau_{и}) = U_{СМ} - U_0 - (I_{Ф} + I_{Т})R_{Н} - I_{ФД \max} r, \quad (4.27)$$

где $U_{СМ}$ – напряжение смещения ФД;

U_0 – напряжение, ограничивающее область линейной работы ФД;

$I_{Ф}$ – фототок от фоновой засветки;

$I_{Т}$ – темновой ток ФД.

Приравнивая друг другу выражения (4.25) и (4.27), можно получить выражение для P_{\max} . Верхний предел измерений энергии импульса излучения выражается формулой $W_{и \max} = P_{\max} \tau_{и}$, а общее выражение имеет вид

$$W_{и \max} = \frac{[(U_{СМ} - U_0) - (I_{Ф} + I_{Т})R_{Н}] \tau_{и}}{S_1 \left[r \left(1 - e^{-\tau_{и}/\tau_0} \right) + R_{Н} F_{\max}(t) \right]}. \quad (4.28)$$

Вычисление значения функции $F_{\max}(t)$ достаточно трудоемко, поэтому в инженерных расчетах удобнее пользоваться упрощенным выражением

$$F_{\max}(t) = 1 - e^{-\tau_{и}/\tau_{ФД}}, \quad (4.29)$$

где $\tau_{\text{ФД}} = [\tau_0^2 + R_{\text{Н}}^2(C_{\text{Н}} + C_{\text{ФД}})^2]^{1/2}$.

Это выражение соответствует упрощенной эквивалентной схеме фотодиода, в соответствии с которой напряжение на нагрузочной цепи ФД изменяется по экспоненциальному закону (см. пунктирную линию на нижней временной диаграмме рисунка 4.4). Использование выражения (4.29) приводит к некоторому завышению амплитуды импульса напряжения на нагрузочной цепи ФД. Можно показать, что приближенное и точное значения амплитуды импульса будут отличаться не более чем на 15 %. Подстановка выражения (4.29) в формулу (4.28) приводит к незначительному уменьшению верхнего предела измерений по энергии, что допустимо при расчетах динамического диапазона, т.к. при этом обеспечивается некоторый запас по линейности для реального ФД. Формула для расчета верхнего предела измерений ЛД в режиме измерений энергии импульса ЛИ с учетом формулы (4.29) принимает вид

$$W_{\text{и max}} = \frac{[(U_{\text{СМ}} - U_0) - (I_{\text{Ф}} + I_{\text{Т}})R_{\text{Н}}]\tau_{\text{и}}}{\tau_{\text{ОП}}S_{\text{I}} \left[r \left(1 - e^{-\tau_{\text{и}}/\tau_0} \right) + R_{\text{Н}} \left(1 - e^{-\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ФД}}} \right) \right]}, \quad (4.30)$$

где $\tau_{\text{ОП}}$ – коэффициент пропускания оптической системы, входящей в состав фотоприемного устройства (ФПУ).

В соответствии с требованиями п. 4.1.1 лазерные дозиметры должны иметь канал измерения средней мощности непрерывного излучения $P(t)$ или облученности от непрерывного излучения $E(t)$. Из формулы (4.30) легко можно получить выражение для вычисления верхнего предела измерений средней мощности непрерывного излучения, предполагая, что этот режим измерений аналогичен режиму измерений максимальной мощности «длинных» импульсов, для которого выполняются условия: $\tau_{\text{и}} \gg \tau_0$; $\tau_{\text{и}} \gg \tau_{\text{ФД}}$. Используя соотношение $P_{\text{max}} = W_{\text{и max}} / \tau_{\text{и}}$, из формулы (4.30) получаем

$$P_{\text{max}} = \frac{U_{\text{СМ}} - U_0 - (I_{\text{Ф}} + I_{\text{Т}})R_{\text{Н}}}{\tau_{\text{ОП}}S_{\text{I}}(r + R_{\text{Н}})}. \quad (4.31)$$

Вычислим значение нижнего предела диапазона измерений энергии импульса лазерного излучения. Наименьшая измеряемая энергия определяется допустимой погрешностью измерений для малых сигналов, вызванной шумами канала преобразования. Считаем, что основным источником шума в схеме ЛД, реализующей МИА, является фотодиод. У фотодиодов с большой фоточувствительной поверхностью, например, типа ФД-24К, составляющая шума со спектральной плотностью пропорциональной $1/F$ (где F – частота) существенно превышает другие составляющие шума в полосе частот от нуля до

некоторой граничной частоты $F_{ГР}$. При $F \geq F_{ГР}$ преобладает т.н. «белый» шум, спектральная плотность которого постоянна [100].

Как правило, из технической документации на ФД конкретного типа (например, из технических условий, ТУ) известно среднеквадратическое значение шумового напряжения $(\sqrt{U_{Ш}^2})_{ТУ}$, измеренное при сопротивлении нагрузки $R_{Н ТУ}$ на резонансной частоте $F_{Р ТУ}$ в полосе частот $\Delta F_{ТУ}$. В схеме ЛД, реализующей МИА, верхняя граничная частота полосы пропускания определяется постоянной времени интегрирования в соответствии с формулой $F_{В} = 1,59(2\pi\tau_{инт})^{-1}$. Нижняя граничная частота полосы пропускания $F_{Н}$ определяется наименьшей постоянной времени τ_p разделительных RC - цепей в соответствии с формулой $F_{Н} = 1,59(2\pi\tau_p)^{-1}$, где $\tau_p = RC$. Если разделительные RC -цепи в схеме отсутствуют, т.е. схема работает по постоянному току, считаем, что $\tau_p = t_{изм}$, где $t_{изм}$ – время измерения.

Значение шумового напряжения, приведенное к выходу интегратора без учета его коэффициента усиления, можно вычислить по формуле

$$\left(\overline{U_{Ш}^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{Н}}{R_{Н ТУ}} \left(\overline{U_{Ш ТУ 1}^2} \frac{\Delta F}{\Delta F_{ТУ}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{при } F_{Н} \geq F_{ГР} \\ \frac{R_{Н}}{R_{Н ТУ}} \left[\frac{\ln\left(\frac{F_{В}}{F_{Н}}\right)}{\ln\left(\frac{F_{В ТУ}}{F_{Н ТУ}}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{при } F_{В} < F_{ГР} \end{array} \right. , \quad (4.32)$$

где $\left(\overline{U_{Ш ТУ 1}^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ – значение напряжения шума, приведенное в ТУ для $F \leq F_{ГР}$;

$\left(\overline{U_{Ш ТУ 2}^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ – значение напряжения шума, приведенное в ТУ для $F > F_{ГР}$;

$$\Delta F = F_{В} - F_{Н}; F_{В ТУ} = F_{Р ТУ} + 0,5 \Delta F_{ТУ}; F_{Н ТУ} = F_{Р ТУ} - 0,5 \Delta F_{ТУ}.$$

Выразим верхнюю граничную частоту пропускания через максимальную длительность импульса излучения по формуле $F_{В} = 1,59(2\pi\tau_{инт})^{-1} = 0,253\eta/\tau_{и \max}$. Очевидно, можно сопоставить значению частоты $F_{ГР}$ некоторое граничное значение $\tau_{и \max ГР} = 0,253 \eta / F_{ГР}$; тогда, если $\tau_{и \max} > \tau_{и \max ГР}$ нужно учитывать напряжение шума со спектральной плотностью $1/F$, а, если $\tau_{и \max} \leq \beta \tau_{и \max ГР}$, где $\beta = F_{Н} / F_{В}$, нужно учитывать только «белый» шум. Нижний предел измерений ЛД в режиме измерения энергии импульсов излучения можно вычислить по формуле

$$W_{и \min} = \mu_{сш} \frac{\left(\overline{U_{Ш}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \tau_{и \max}}{\tau_{оп} S_1 R_{Н} \eta}, \quad (4.33)$$

где $\mu_{\text{СШ}}$ – требуемое соотношение «сигнал – шум».

Динамический диапазон ЛД в режиме измерений энергии импульсов ЛИ выражается формулой $D_w = W_{\text{и max}} / W_{\text{и min}}$. Используя формулы (4.30), (4.33), получаем обобщенную формулу для расчета динамического диапазона ЛД в режиме измерения энергии импульсов ЛИ в заданном диапазоне длительностей импульсов от $\tau_{\text{и min}}$ до $\tau_{\text{и max}}$

$$D_w = \left. \begin{array}{l} 2,5 \frac{R_H}{\mu_{\text{СШ}}} \frac{\eta \Delta F_{\text{ТУ}}}{\left(U_{\text{ШТУ1}}^2\right)^{\frac{1}{2}} \tau_{\text{и max}} (1-\beta)} \frac{\tau_{\text{и min}} [U_{\text{СМ}} - U_0 - (I_{\Phi} + I_{\text{T}}) R_H]}{\left[r \left(1 - e^{-\tau_{\text{и min}} / \tau_0} \right) + R_H \left(1 - e^{-\tau_{\text{и min}} / \tau_{\text{ФД}}} \right) \right]} \quad \text{при } \tau_{\text{и max}} \leq \beta \tau_{\text{и max ГР}} \\ \frac{R_H \eta \tau_{\text{и min}}}{\mu_{\text{СШ}} \tau_{\text{и max}}} \frac{\ln(F_{\text{ВТУ}} / F_{\text{НТУ}})}{\left(U_{\text{ШТУ2}}^2\right)^{\frac{1}{2}} \ln(1/\beta)} \frac{U_{\text{СМ}} - U_0 - (I_{\Phi} + I_{\text{T}}) R_H}{\left[r \left(1 - e^{-\tau_{\text{и min}} / \tau_0} \right) + R_H \left(1 - e^{-\tau_{\text{и min}} / \tau_{\text{ФД}}} \right) \right]} \quad \text{при } \tau_{\text{и max}} > \tau_{\text{и max ГР}} \end{array} \right\} \quad (4.34)$$

В режиме измерений средней мощности непрерывного излучения $P(t)$ в схеме ЛД, реализующей МИА, интегратор отключается, и верхняя граничная частота полосы пропускания схемы определяется постоянной времени $\tau_{\text{ФД}}$, значение которой в этом режиме, как правило, близко к значению $\tau_{\text{и max ГР}}$. Для расчета динамического диапазона ЛД в режиме измерений $P(t)$ можно воспользуемся второй формулой в выражении (4.34), положив в ней $\tau_{\text{и min}} = \tau_{\text{и max}}$ и, считая, что $\tau_{\text{и max}} \gg \tau_0$. Тогда с учетом (4.31) получаем

$$P_{\text{min}} = \frac{\mu_{\text{СШ}}}{\tau_{\text{ОП}} S_1 R_{\text{НТУ}}} \left(U_{\text{ШТУ}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\ln(1/\beta_1)}{\ln(F_{\text{ВТУ}} / F_{\text{НТУ}})}; \quad (4.35)$$

$$D_p = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} = \frac{R_{\text{НТУ}} [U_{\text{СМ}} - U_0 - (I_{\Phi} + I_{\text{T}}) R_H] \ln(F_{\text{ВТУ}} / F_{\text{НТУ}})}{\mu_{\text{СШ}} (r + R_H) \left(U_{\text{ШТУ2}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \ln(1/\beta_1)}; \quad (4.36)$$

где $\beta_1 = 2\pi F_H \tau_{\text{ФД}}$.

Например, для случая, когда $I_{\Phi} = 0$, при $\mu_{\text{СШ}} = 30$, $\beta_1 = 4 \cdot 10^{-5}$, $R_H = 10$ кОм, $U_{\text{СМ}} = 27$ В, $U_0 = 5$ В для ЛД, использующего в качестве приемника излучения фотодиод ФД-24К, получаем по формуле (4.31) $P_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-2}$ Вт, а по формулам (4.35), (4.36) – $P_{\text{min}} = 4 \cdot 10^{-7}$ Вт, $D_p = 5 \cdot 10^4$.

В таблице 4.3 приведены значения динамического диапазона ЛД в режиме измерений энергии импульсов лазерного излучения D_w с помощью ЛД, в котором в качестве приемника излучения используется фотодиод ФД-24К. В таблице 4.3 приведены также значения верхнего $W_{\text{и max}}$ и нижнего $W_{\text{и min}}$ пределов диапазона измерений. В скобках также приведены ближайшие наименьшие кратные десяти значения $W_{\text{и max}}$ и D_w и

ближайшее наибольшее кратное десяти значение $W_{и\ min}$. Расчеты проводились для $\mu_{сш} = 20$, $U_{сш} = 27$ В, $U_0 = 22$ В, $S_1 = 0,2$ А /Вт, $r = 50$ Ом, $\tau_0 = 10^{-7}$ с, $\eta = 0,04$. Из таблицы 4.3 следует, что в рассматриваемой схеме ЛД не удастся обеспечить $D_w \geq 10^2$ во всем требуемом диапазоне длительностей импульсов ЛИ. Оптимальным для данной схемы является использование следующих поддиапазонов длительностей: $10^{-8} - 10^{-6}$ с (1-ый поддиапазон); $10^{-6} - 10^{-3}$ с (2-ой поддиапазон); $10^{-3} - 10^{-2}$ с (3-ий поддиапазон). При этом в 1-ом поддиапазоне: $W_{и\ min} = 10^{-10}$ Дж, $W_{и\ max} = 10^{-7}$ Дж, $D_w = 10^3$; во 2-ом: $W_{и\ min} = 10^{-8}$ Дж, $W_{и\ max} = 10^{-6}$ Дж, $D_w = 10^2$; в 3-ем: $W_{и\ min} = 10^{-8}$ Дж, $W_{и\ max} = 10^{-5}$ Дж, $D_w = 10^3$.

Т а б л и ц а 4.3. Значения верхнего $W_{и\ max}$ и нижнего $W_{и\ min}$ пределов диапазона измерений и значения динамического диапазона измерений D_w

$\tau_{и\ min}$	$W_{и\ min}$, $W_{и\ max}$ (Дж) и D_w при $\tau_{и\ max}$, с				
	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
10^{-9}	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $8,6 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $8,6 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-10}$ (10^{-9}) $7,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,2 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-9}$ (10^{-8}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $8,6 \cdot 10$ (10)	$4,7 \cdot 10^{-8}$ (10^{-7}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,2 \cdot 10$ (10)
10^{-8}	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $8,6 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $8,6 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-10}$ (10^{-9}) $7,9 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,2 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-10}$ (10^{-9}) $5,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $8,6 \cdot 10^3$ (10^3)	$4,7 \cdot 10^{-8}$ (10^{-7}) $5,8 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,2 \cdot 10$ (10)
10^{-7}	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $6,9 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,1 \cdot 10^4$ (10^4)	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $6,9 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,1 \cdot 10^4$ (10^4)	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $9,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,5 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $6,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $9,7 \cdot 10$ (10)	$4,7 \cdot 10^{-8}$ (10^{-7}) $6,7 \cdot 10^{-7}$ (10^{-7}) $1,4 \cdot 10$ (10)
10^{-6}	–	$6,6 \cdot 10^{-11}$ (10^{-10}) $1,8 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $2,7 \cdot 10^4$ (10^4)	$6,6 \cdot 10^{-10}$ (10^{-9}) $1,4 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $2,7 \cdot 10^4$ (10^4)	$6,6 \cdot 10^{-9}$ (10^{-8}) $1,4 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $2,1 \cdot 10^2$ (10^2)	$4,7 \cdot 10^{-8}$ (10^{-7}) $1,3 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $2,8 \cdot 10$ (10)
10^{-5}	–	–	$6,6 \cdot 10^{-10}$ (10^{-9}) $2,9 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $4,4 \cdot 10^3$ (10^3)	$6,6 \cdot 10^{-9}$ (10^{-8}) $2,9 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $4,4 \cdot 10^2$ (10^2)	$4,7 \cdot 10^{-8}$ (10^{-8}) $2,0 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $4,2 \cdot 10$ (10)
10^{-4}	–	–	–	$6,6 \cdot 10^{-9}$ (10^{-8}) $1,9 \cdot 10^{-5}$ (10^{-5}) $2,9 \cdot 10^3$ (10^3)	$4,7 \cdot 10^{-8}$ (10^{-8}) $3,1 \cdot 10^{-6}$ (10^{-6}) $6,6 \cdot 10$ (10)
10^{-3}	–	–	–	–	$6,6 \cdot 10^{-9}$ (10^{-8}) $1,9 \cdot 10^{-5}$ (10^{-5}) $2,9 \cdot 10^3$ (10^3)

П р и м е ч а н и я

- 1 Значения $W_{и\ min}$, $W_{и\ max}$ и D_w приведены, соответственно, в 1-ой, 2-ой, 3-ой строках каждой ячейки.
- 2 При расчетах принимали: $R_H = 100$ Ом ($\tau_{и\ min} = 10^{-9}, 10^{-8}, 10^{-7}$ с), $R_H = 1$ кОм ($\tau_{и\ min} = 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ с).

4.2 Дозиметры лазерного излучения, методы и средства их поверки

В этом параграфе рассмотрены отечественные лазерные дозиметры, разработанные при непосредственном участии соискателя. Все рассматриваемые типы лазерных дозиметров внесены в Государственный реестр средств измерений и полностью соответствуют требованиям ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 [30].

4.2.1 Лазерные дозиметры ИЛД-2, ИЛД-2М

С 1973 г. во ВНИИОФИ Госстандарта СССР под руководством соискателя велась разработка лазерного дозиметра по техническому заданию (ТЗ) Института биофизики Минздрава СССР, В результате проведенной НИР был создан экспериментальный образец ЛД типа ИЛД-1, который открыл серию изделий с аббревиатурой ИЛД (измеритель для лазерной дозиметрии). В 1974 г. по ТЗ одного из ведущих предприятий в лазерной отрасли ЦКБ «Астрофизика» во ВНИИОФИ началась разработка «Измерителя для лазерной дозиметрии ИЛД-2». Лазерный дозиметр ИЛД-2 успешно прошел государственные приемочные испытания, и его серийное производство было начато на Волгоградском опытном заводе (ВОЗ) «Эталон», входившем в структуру Госстандарта СССР (ныне ВОЗ «Эталон» не существует). В процессе освоения серийного производства ИЛД-2 был модернизирован и начался выпуск лазерного дозиметра ИЛД-2М.

Внешний вид лазерного дозиметра ИЛД-2 показан на рисунке 3.1 Приложения 3, а дозиметра ИЛД-2М – на рисунке 3.2. Технические характеристики лазерного дозиметра ИЛД-2М приведены в таблице 3.1 Приложения 3.

В комплект дозиметра ИЛД-2 входят два сменных фотоприемных устройства ФПУ-А и ФПУ-Б; электронный блок преобразования и регистрации (БПР); штатив с углоповоротным устройством и устройством наведения, в качестве которых используется теодолит Т-15. Фотоприемные устройства дозиметра ИЛД-2 предназначены для работы в спектральных диапазонах 0,49 – 1,15 мкм (ФПУ-А) и 2 – 11 мкм (ФПУ-Б).

Структурная схема дозиметра, приведенная на рисунке 4.5, реализует метод интегрирования с автосинхронизацией, подробно описанный в п. 4.1.2.

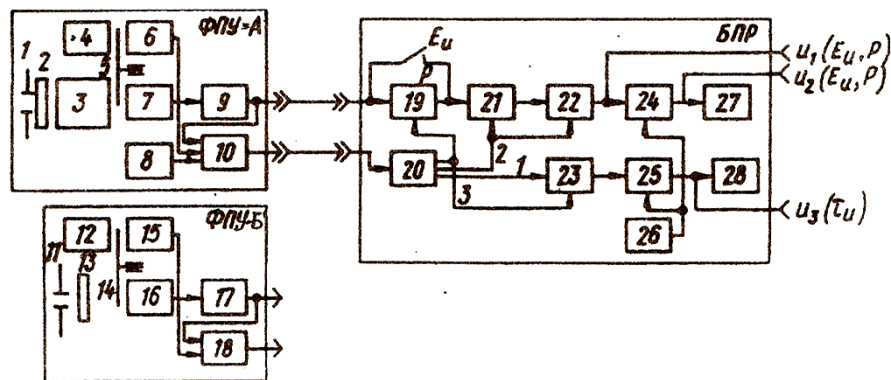


Рисунок 4.5 – Структурная схема лазерного дозиметра ИЛД-2: 1, 11 – апертурная диафрагма; 2, 13 – ослабитель излучения; 3 – оптический блок; 4, 12 – опорный излучатель; 5, 14 – электромеханический модулятор; 6, 15 – опорный фотодиод; 7 – фотодиод ФД-24К; 8 – фотодиод ФД-9Э111А; 9, 10, 17, 18 – блок согласования; 16 – болометр БП 1-2; 19 – импульсный интегратор; 20 – блок схемы формирования синхроимпульсов; 21 – усилитель; 22 – блок схемы восстановления нулевого уровня; 23 – преобразователь временного интервала; 24, 25 – блок измерения амплитуды импульса; 26 – реле времени; 27, 28 – стрелочный индикатор

Рассмотрим работу схемы в режиме измерения энергии повторяющихся импульсов излучения, для чего используем временные диаграммы, приведенные на рисунке 4.6. Пусть во входной зрачок ФПУ-А, поступают три последовательных импульса ЛИ разной мощности $P_{и1}, P_{и2}, P_{и3}$ и разной длительности $\tau_{и1}, \tau_{и2}, \tau_{и3}$, причем выполняется условие $W_{и3} < W_{и1} < W_{и2}$, где $W_{и} = P_{и} \tau_{и}$ – энергия импульса излучения (на рисунках 4.5, 4.6 приняты условные обозначения $E_{и} = W_{и}, E_{и1} = W_{и1}, E_{и2} = W_{и2}, E_{и3} = W_{и3}$).

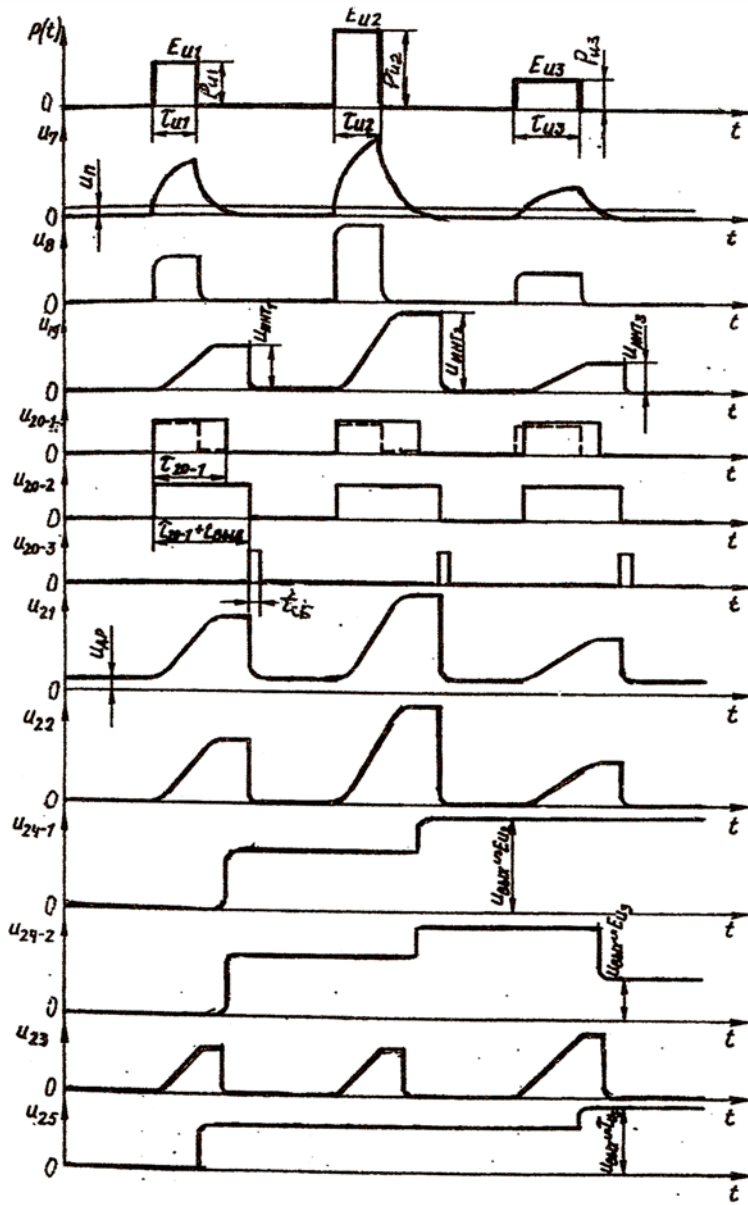


Рисунок 4.6 – Временные диаграммы работы ИЛД-2 в режиме измерения энергии повторяющихся импульсов ЛИ

Импульсы излучения проходят через ослабитель излучения 2, оптическую систему 3 и поступают на фотодиод 7 типа ФД-24К. На нагрузочной $R_{н}C_{н}$ – цепочке фотодиода 7 формируются импульсы напряжения $U_7(t)$ с постоянной времени нарастания и спада $\tau_{ФД}$, определяемой собственной постоянной времени фотодиода, и величиной $\tau_{н} = R_{н}C_{н}$ (см. п. 4.1.3).

С выхода фотодиода сигнал через блок согласования 9 поступает на импульсный интегратор 19, на выходе которого формируется напряжение $U_{19}(t)$ с амплитудой $U_{инт \max}$, пропорциональной энергии импульса излучения. Одновременно через блок согласования 10 сигнал фотодиода поступает на блок формирования

синхроимпульсов (СФС) 20, выходные сигналы которого $U_{20-1}(t) - U_{20-3}(t)$ служат для управления работой всей схемы БПР. Импульсы $U_{20-1}(t)$ имеют длительность τ_{20-1} равную длительности импульсов $U_7(t)$ по уровню порога срабатывания $U_{п}$ блока 20. Импульсы $U_{20-2}(t)$ имеют длительность $\tau_{20-1} + t_{в}$, где $t_{в}$ – время выдержки, импульсы $U_{20-3}(t)$ – представляют

собой импульсы сброса длительностью $t_{сб}$. Значения t_b и $t_{сб}$ выбираются в соответствии с формулой (4.18). Импульсы $U_{20-3}(t)$ поступают на интегратор 19 и сбрасывают напряжение $U_{19}(t)$ до нуля, после чего схема готова к преобразованию следующего импульса ЛИ из последовательности.

С выхода интегратора 19 импульсы напряжения поступают на усилитель 21, на выходе которого формируются усиленные импульсы напряжения $U_{21}(t)$. Из-за большого значения коэффициента усиления на выходе усилителя 21 возможно возникновение постоянной составляющей сигнала, вызванной дрейфом усилительных каскадов. Для устранения этого нежелательного компонента сигнала применена схема восстановления нулевого уровня 22, на выходе которой сигнал $U_{22}(t)$ не имеет постоянной составляющей. Импульсы напряжения $U_{22}(t)$ поступают на аналоговый блок измерения амплитуды 24, представляющий собой управляемый пиковый детектор, который может работать как в режиме запоминания наибольшего значения амплитуды входных импульсов, так и в режиме запоминания текущего значения их амплитуд.

В первом режиме наибольшее значение выходного сигнала $U_{24-1}(t)$ по окончании процесса измерения пропорционально наибольшей энергии $W_{и2}$ импульсов излучения, а во втором режиме значение выходного сигнала $U_{24-2}(t)$ пропорционально энергии последнего импульса из последовательности.

В схеме ИЛД-2 предусмотрена возможность измерения длительности импульса излучения $\tau_{и}$. В режиме измерения $\tau_{и}$ ЛИ подается на малоинерционный фотодиод типа ФД-9Э111А, на нагрузке которого формируются импульсы напряжения $U_8(t)$, повторяющие форму импульсов излучения. В этом режиме импульсы $U_{20-1}(t)$ имеют длительность примерно равную длительности $\tau_{и}$. Импульсы напряжения $U_{20-1}(t)$ стандартной амплитуды и разной длительности поступают на преобразователь временных интервалов 23, построенный на основе импульсного интегратора. Амплитуда выходных импульсов $U_{23}(t)$ пропорциональна длительности импульсов излучения $\tau_{и}$. Сигналы $U_{23}(t)$ поступают на блок измерения амплитуды 25, который работает аналогично блоку 24. Выходные напряжения $U_{24-1}(t)$, $U_{24-2}(t)$ и $U_{25}(t)$ измеряются стрелочными приборами 27, 28. В схеме БПР предусмотрена возможность автоматического сброса показаний по окончании требуемого времени контроля, которое устанавливается с помощью реле времени (таймера) 26.

В режиме измерения средней мощности непрерывного лазерного излучения $P(t)$ (см. рисунок 4.7) излучение, прошедшее через оптический блок 3, периодически прерывается с помощью электромеханического модулятора 5 и на фотодиод 7 поступает импульсно-модулированное излучение.

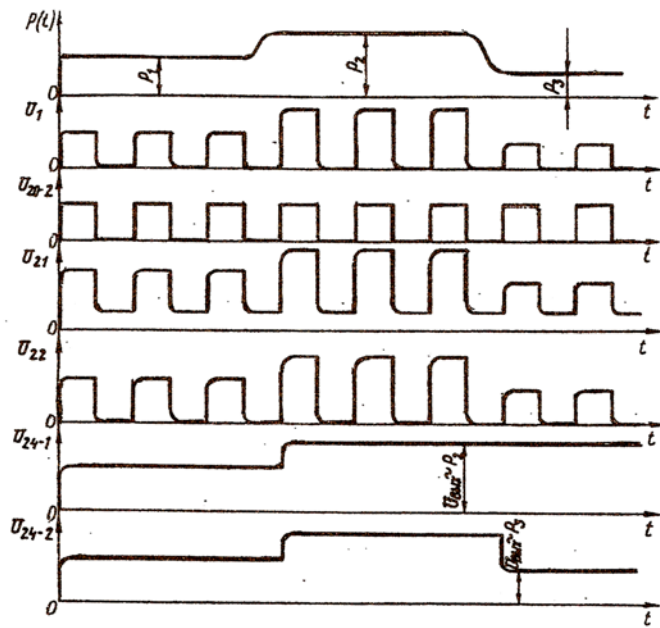


Рисунок 4.7 – Временные диаграммы работы лазерного дозиметра ИЛД-2 в режиме измерения средней мощности (облученности) лазерного излучения

Частота прерывания сигнала равна 25 Гц при скважности 2; форма импульсов $U_7(t)$ на нагрузке фотодиода близка к прямоугольной. В рассматриваемом режиме измерений импульсы напряжения $U_7(t)$ поступают без интегрирования непосредственно на усилитель 21, а дальнейший процесс преобразования сигнала протекает так же, как и в описанном выше режиме измерения энергии импульсов излучения. Напряжение на выходе блока 24

пропорционально либо наибольшему значению средней мощности непрерывного излучения (диаграмма $U_{24-1}(t)$), либо ее текущему значению (диаграмма $U_{24-2}(t)$). На рисунке 4.8 приведена схема оптико-механического узла ФПУ-А. Апертурная диафрагма 1 применяется при измерении энергетической экспозиции (облученности) от падающего излучения. Блок сменных ослабителей 2 обеспечивает широкий диапазон измерений ЭП ЛИ за счет введения в оптический тракт ослабителей ЛИ из стекол НС-10 и НС-6, а также сетчатых ослабителей. Ослабители в блоке 2 расположены так, что между последовательно введенными стеклянными ослабителями вводится сетчатый ослабитель. Такая компоновка позволяет уменьшить неучтенные погрешности определения суммарного коэффициента ослабления путем исключения переотражения излучения между стеклянными ослабителями. Блок 2 обеспечивает наибольший суммарный коэффициент ослабления 10^6 . Объектив 4, полевая диафрагма 5 и двухлинзовый конденсор, состоящий из линз 6, 7, формируют два угла поля зрения ФПУ-А: 15 угл. град. при диаметре полевой диафрагмы 34,8 мм и 5 угл. град. при диаметре 8,8 мм. В режиме измерения длительности импульсов ЛИ в оптический тракт вводится сменный фотоприемный узел 12, состоящий из линзы 14 и малоинерционного фотодиода 13 типа ФД-9Э111А.

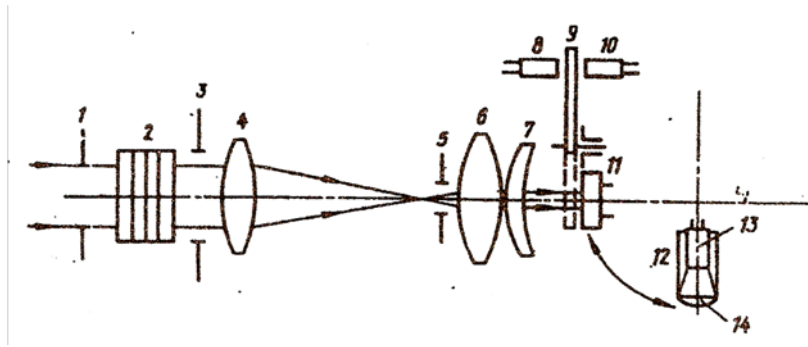


Рисунок 4.8 – Схема опико-механического узла ФПУ-А:
 1 – апертурная диафрагма; 2 – блок сменных ослабителей излучения; 3 – апертурная диафрагма объектива; 4 – объектив;
 5 – полевая диафрагма; 6, 7 – конденсор; 8 – опорный излучатель; 9 – электромеханический модулятор;
 10 – опорный фотодиод; 11 – фотодиод ФД-24К; 12 – сменный фотоприемный узел; 13 – фотодиод ФД-9Э111А; 14 – линза

рисунок 4.5) на блок формирования синхроимпульсов 20.

Основные отличия модернизированного лазерного дозиметра ИЛД-2М (рисунок 3.2) от ИЛД -2 (рисунок 3.1) заключаются в следующем:

- в ИЛД-2М применено одно объединенное фотоприемное устройство (ФПУ) 1, предназначенное для работы в спектральных диапазонах 0,49 – 1,15 и 2 – 11 мкм;
- в ФПУ отсутствует относительно громоздкий электромеханический модулятор, вместо которого применен электронный модулятор сигнала, управляемый импульсами, поступающими с выхода задающего электронного генератора;
- в ИЛД-2М применена новая конструкция блока БПР, которая сделала БПР более удобным в настройке и эксплуатации и повысила его ремонтпригодность; в новом БПР используется один стрелочный индикатор показаний вместо двух;

Основное схемотехническое решение ИЛД-2М осталось таким же, как и у ИЛД-2, поэтому основные метрологические характеристики не изменились.

4.2.2 Многоцелевые лазерные дозиметры ЛДМ-1, ЛДМ-2

В начале 80-х годов во ВНИИОФИ под руководством соискателя началась разработка лазерного дозиметра второго поколения, который должен был превосходить ИЛД-2М по функциональным возможностям и при этом быть более компактным и удобным в эксплуатации. В результате был разработан и внедрен в серийное производство на ВОЗ «Эталон» многоцелевой лазерный дозиметр ЛДМ-1. В процессе освоения серийного производства ЛДМ-1 была проведена его модернизация. В результате модернизации была изменена конструкция БПР, и прибор стал соответствовать более высоким эргономическим требованиям. Модернизированный прибор выпускался как многоцелевой лазерный

В режиме измерения средней мощности НЕПР ЛИ полудиск модулятора 9 периодически перекрывает поток ЛИ и поток излучения от источника 8. Опорный сигнал с выхода фотодиода 10, находящийся в противофазе с основным сигналом, подается через блок согласования 10 (см.

дозиметр ЛДМ-2. Общий вид лазерного дозиметра ЛДМ-1 показан на рисунке 3.3 Приложения 3, а дозиметра ЛДМ-2 – на рисунке 3.4. Технические характеристики многоцелевого лазерного дозиметра ЛДМ-2 приведены в таблице 3.2 Приложения 3.

В комплект дозиметров входят:

- два сменных фотоприемных устройства ФПУ-1, ФПУ-2 и БПР;
- комплект сменных ослабителей излучения;
- очки для защиты от лазерного излучения (позиция 6 на рисунке 3.3).

По желанию потребителя в комплект лазерного дозиметра включалась гарнитура 7 для крепления ФПУ-1 или ФПУ-2 на голове оператора (рисунок 3.3). В комплект дозиметра также входят: блок сетевого питания, углоповоротное устройство, штатив и футляр для переноски БПР. Фотоприемные устройства дозиметра предназначены для работы в спектральных диапазонах 0,49 – 1,15 мкм (ФПУ-1) и 2 – 11 мкм (ФПУ-2).

Дозиметр ЛДМ-1 существенно превосходит лазерный дозиметр ИЛД-2М по своим техническим характеристикам, прежде всего тем, что он имеет на порядок более высокую чувствительность. Кроме того он имеет значительно меньшие габаритные размеры и массу. Это обеспечивает дополнительные удобства при его эксплуатации и позволяет проводить как предупредительный так и индивидуальный дозиметрический контроль.

На рисунке 4.9 показано как оператор-дозиметрист проводит предупредительный дозиметрический контроль диффузно отраженного лазерного излучения. Он осуществляет наведение ФПУ на предполагаемый источник ДИФ ЛИ (при этом лазерное излучение не подается). После подачи лазерного излучения оператор-дозиметрист наблюдает результаты измерений на лицевой панели БПР, который расположен в футляре с ремнем на теле оператора так, что, снимая показания, оператор смотрит вниз, а не в сторону источника излучения. Такая методика проведения измерений повышает безопасность оператора, предотвращая возможность облучения его глаз.

На рисунке 4.10 показано как проводится индивидуальный дозиметрический контроль. При этой форме контроля ФПУ закрепляется либо на защитных очках, используемых оператором лазерной установки, либо на гарнитуре 7 (рисунок 3.3).

Это позволяет проводить измерения в наиболее опасной точке контроля, расположенной вблизи глаз оператора. Во время проведения контроля оператор, выполняя свои служебные операции, не управляет работой дозиметра и не снимает его показания. Дозиметр в соответствии с заранее установленной программой режимов измерений фиксирует максимальные значения энергетических параметров излучения за требуемое время контроля. Дозиметры снабжены устройством звуковой сигнализации, которое

срабатывает, когда уровень энергетической экспозиции (облученности) от падающего излучения превышает ПДУ, предупреждая оператора о возникшей опасности.



Рисунок 4.9 – Проведение предупредительного дозиметрического контроля лазерного излучения с помощью лазерного дозиметра ЛДМ-1



Рисунок 4.10 – Проведение индивидуального дозиметрического контроля лазерного излучения с помощью лазерного дозиметра ЛДМ-1

Схемы ЛДМ-1 и ЛДМ-2 идентичны и реализуют метод интегрирования с автосинхронизацией, однако аналоговая часть, в которой реализован МИА, построена несколько по другой схеме по сравнению со схемой, рассмотренной в п. 4.1.2 и примененной в лазерном дозиметре ИЛД-2М.

Структурная схема аналоговой части схемы дозиметров ЛДМ-1 и ЛДМ-2 приведена на рисунке 4.11. На рисунке 4.12 приведены временные диаграммы напряжений и токов на выходах блоков схемы. Схема работает следующим образом.

Пусть во входной зрачок ФПУ-1 поступают два последовательных импульса лазерного излучения разной мощности $P_{и1}$, $P_{и2}$ и разной длительности $\tau_{и1}$, $\tau_{и2}$, причем выполняется условие $W_{и1} < W_{и2}$, где $W_{и} = P_{и} \tau_{и}$ – энергия импульса излучения.

На выходе приемника излучения 1 (фотодиода типа ФД-24К) формируются импульсы фототока $I_1(t)$, которые преобразуются в аналогичные по форме импульсы напряжения $U_2(t)$ в преобразователе 2, а затем в импульс тока заряда интегратора $I_3(t)$ в преобразователе 3.

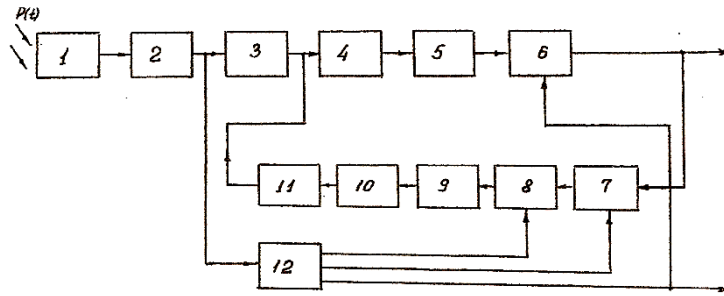


Рисунок 4.11 – Структурная схема аналоговой части общей схемы лазерного дозиметра ЛДМ-1: 1 – ФПУ-1; 2 – преобразователь фототока в напряжение; 3 – преобразователь напряжения в ток; 4 – импульсный интегратор; 5 – усилитель; 6 – блок схемы восстановления нулевого уровня; 7 – пиковый детектор; 8 – аналоговый ключ; 9 – инвертор; 10 – масштабный преобразователь; 11 – преобразователь напряжения в ток; 12 – блок схемы формирования синхроимпульсов

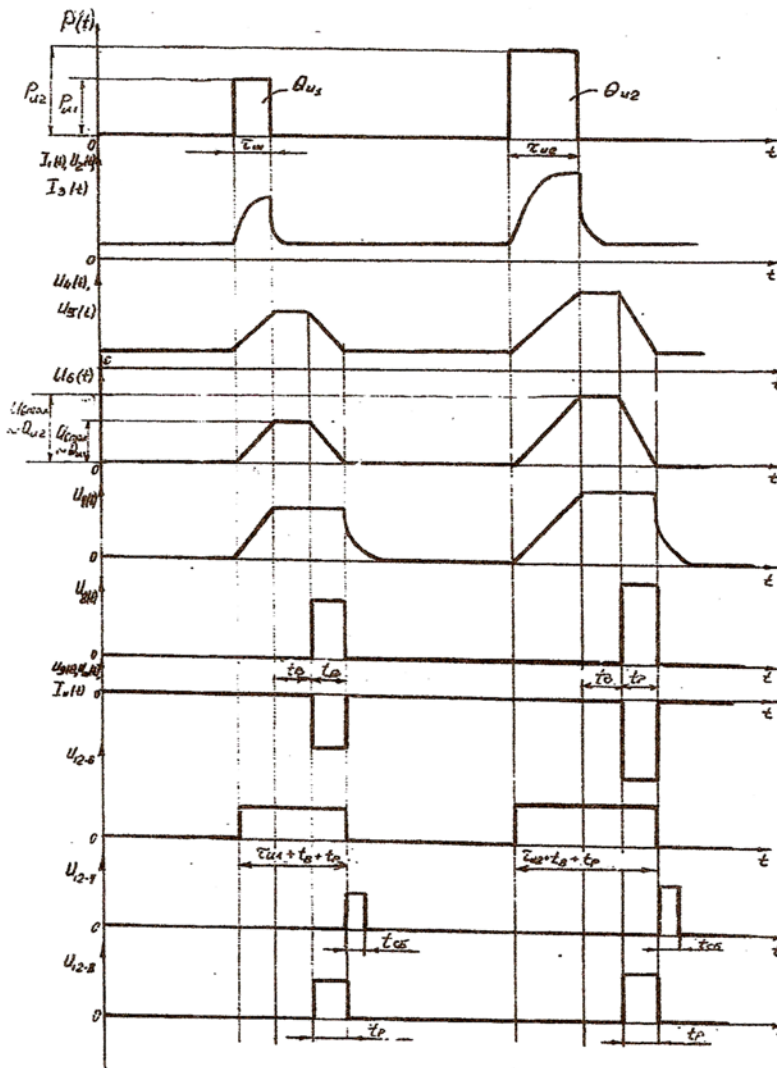


Рисунок 4.12 – Временные диаграммы, поясняющие работу аналоговой части общей схемы лазерного дозиметра ЛДМ-1

Сигналы $I_1(t)$, $U_2(t)$, $I_3(t)$ имеют в общем случае постоянную составляющую, обусловленную фототоком от излучения фона и темновым током фотодиода.

На выходе импульсного интегратора 4 формируется напряжение $U_4(t)$, амплитуда переменной составляющей которого пропорциональна энергии импульсов излучения. Напряжение с выхода интегратора усиливается в усилителе 5, после чего поступает на блок восстановления нулевого уровня 6. На выходе блока 6 формируются импульсы напряжения $U_6(t)$ без

постоянной составляющей. С выхода блока восстановления 6 импульсы поступают на пиковый детектор 7, на выходе которого формируются импульсы $U_7(t)$, длительность которых превышает длительность входных импульсов, а амплитуда равна амплитуде входных импульсов.

С выхода преобразователя 2 сигнал $U_2(t)$ поступает на блок схемы формирования синхроимпульсов 12, на выходе которого формируются три вида синхроимпульсов: $U_{12-6}(t)$ длительностью $\tau_{и} + t_{в} + t_{р}$ (где $t_{в}$ – заданное время выдержки от момента окончания входного импульса до начала разряда импульсного интегратора; $t_{р}$ – заданное время разряда интегратора); $U_{12-7}(t)$ длительностью $t_{сб}$ (где $t_{сб}$ – время сброса напряжения на выходе пикового детектора 7); $U_{12-8}(t)$ длительностью $t_{р}$.

Импульсы $U_{12-6}(t)$ поступают на вход управления схемы восстановления нулевого уровня 6 и обеспечивают вычитание постоянной составляющей из сигнала $U_5(t)$. Импульсы $U_{12-8}(t)$ поступают на вход управления аналогового ключа 8 и обеспечивают прохождение сигнала на выход ключа в течение времени $t_{р}$. Импульсы $U_8(t)$ с выхода ключа 8 поступают на инвертор 9 и меняют полярность. Импульсы $U_9(t)$ уменьшаются в требуемое количество раз по амплитуде в масштабном преобразователе 10, а затем преобразуются в ток разряда интегратора в преобразователе напряжения в ток 11. Сигналы $U_8(t)$, $U_9(t)$, $U_{10}(t)$, $I_{11}(t)$ являются прямоугольными импульсами длительностью $t_{р}$.

При поступлении импульса тока разряда $I_{11}(t)$ на импульсный интегратор он разряжается до уровня постоянной составляющей. По окончании времени разряда напряжение $U_6(t)$ на выходе схемы восстановления 6 спадает до нуля. В этот момент на вход управления пикового детектора 7 поступает короткий импульс сброса $U_{12-7}(t)$, вызывающий быстрый разряд емкости пикового детектора до нуля. По окончании разряда аналоговая часть схемы лазерного дозиметра готова к преобразованию следующего импульса излучения из последовательности, поступающей на приемник излучения.

Использованная в лазерных дозиметрах ЛДМ-1 и ЛДМ-2 схема аналоговой части позволила на порядок снизить нижний предел измерений энергетической экспозиции от импульсов ЛИ по сравнению с лазерным дозиметром ИЛД-2М (у ИЛД-2М нижний предел измерений – 10^{-8} Дж·см⁻², а у ЛДМ-1 и ЛДМ-2 – 10^{-9} Дж·см⁻²). Это достигается тем, что в схеме, приведенной на рисунке 4.11, для разряда емкости интегратора не используются аналоговые электронные ключи в отличие от схемы, реализующей МИА в дозиметре ИЛД-2М. Аналоговые электронные ключи на полевых транзисторах, срабатывают от импульсов управления с амплитудой в несколько вольт. При этом в коммутируемую цепь проникает импульс помехи с амплитудой несколько милливольт, сравнимой с амплитудой импульса, формирующегося на выходе интегратора при измерении малых уровней энергетической экспозиции. Наложение импульса помехи на основной импульс значительно увеличивает погрешность измерения малых уровней энергетической экспозиции. В схеме, примененной в ЛДМ-1 и ЛДМ-2, используется «принудительный» разряд емкости интегратора с

помощью подаваемого на нее импульса тока обратной полярности, и импульсы помехи при этом не возникают.

С выхода схемы восстановления нулевого уровня 6 импульсы поступают на цифровую часть схемы лазерного дозиметра через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), на выходе которого формируются последовательности счетных импульсов, количество которых пропорционально амплитудам входных импульсов напряжения. К выходу АЦП подключены три счетчика: счетчик максимальных значений сигнала (СМЗ); счетчик текущих значений сигнала (СТЗ); счетчик суммарных значений (ССЗ). Кодовые последовательности импульсов с выходов СМЗ и СТЗ поступают на схему сравнения (СС). В результате совместной работы СМЗ, СТЗ, СС по окончании измерений с выхода СМЗ снимается кодовая последовательность, соответствующая наибольшей амплитуде импульса на выходе схемы восстановления нулевого уровня 6, т.е. указанная совокупность цифровых блоков представляет собой цифровой пиковый детектор.

По окончании измерений с выхода СТЗ снимается кодовая последовательность, соответствующая амплитуде последнего импульса на выходе схемы восстановления 6, а с выхода ССЗ снимается кодовая последовательность, соответствующая суммарной амплитуде всех импульсов, поступивших с выхода схемы восстановления 6, т.е. снимается информация о суммарной энергии (суммарной энергетической экспозиции) всех импульсов излучения, поступивших на приемник излучения.

С выхода схемы формирования синхроимпульсов 12 импульсы $U_{12-6}(t)$ поступают через дополнительный блок формирования на счетчик количества импульсов (СКИ). По окончании измерений с выхода СКИ снимается кодовая последовательность, соответствующая количеству всех импульсов ЛИ, поступивших на приемник излучения.

Кодовые последовательности с выходов перечисленных выше счетчиков подаются через блок коммутации режима индикации на цифровой блок индикации, в который входит индикаторный дисплей на светодиодах. По окончании измерений с дисплея в трехразрядном десятичном коде может сниматься следующая информация: максимальная энергетическая экспозиция за время контроля; энергетическая экспозиция от последнего импульса излучения; суммарная энергетическая экспозиция от всех импульсов излучения; количество импульсов излучения. На дисплей в закодированном виде выводится также следующая служебная информация: рабочая длина волны лазерного излучения (закодирована цифрами от 1 до 6); ожидаемое значение ПДУ (закодировано цифрами от 1 до 6); вид измеренного параметра ЛИ (закодирован цифрами от 1 до 4).

При измерении облученности от непрерывного лазерного излучения сигнал с выхода блока 2 (рисунок 4.11) поступает на электронный модулятор, с выхода которого

последовательность прямоугольных импульсов поступает непосредственно на усилитель 5. В результате с выхода блока 6 на цифровую часть схемы дозиметра поступает последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой пропорциональной облученности от падающего лазерного излучения. Дальнейшее преобразование сигнала происходит аналогично описанному выше преобразованию для импульсного излучения.

В рассматриваемом режиме с дисплея в трехразрядном десятичном коде снимается следующая информация: максимальное значение облученности за время контроля; текущее значение облученности; суммарная энергетическая экспозиция от непрерывного излучения за все время контроля; время облучения, измеренное в секундах.

4.2.3 Многоцелевой лазерный дозиметр ЛАДИН

В середине 90-х годов прекратился выпуск дозиметров ИЛД-2М и ЛДМ-2 в связи с закрытием ВОЗ «Эталон». С целью восстановления выпуска лазерных дозиметров для нужд системы ЛБ во второй половине 90-х годов в Медико-техническом объединении «Волна» совместно с ВНИИОФИ (представленным научным сектором под руководством соискателя) был разработан ЛД третьего поколения «Дозиметр лазерный автоматизированный для контроля уровней импульсного и непрерывного лазерного излучения ЛАДИН» (рисунок 3.5 Приложения 3). С 1997 г. ЛАДИН выпускается на предприятии АК «Туламашзавод».

В комплект дозиметра входят:

- три сменных фотоприемных устройства ФПУ-1, ФПУ-2 и ФПУ-3 (позиции 1, 2, 3 на рисунке 3.5);
- электронный блок преобразования и регистрации (БПР) (4 на рисунке 3.5);
- набор сменных ослабителей излучения (не показан на рисунке 3.5);
- блок сетевого питания (адаптер) (не показан на рисунке 3.5).

Фотоприемные устройства дозиметра предназначены для работы в спектральных диапазонах: 0,49 – 1,15 мкм (ФПУ-1); 1,15 – 1,54 мкм (ФПУ-2) и 2 – 11 мкм (ФПУ-3).

ЛАДИН превосходит дозиметры предыдущего поколения по своим функциональным возможностям, в частности, тем, что он может автоматически в процессе измерений вычислять значения ПДУ как в соответствии с СН 5804 [17] так и в соответствии со стандартом ИЕС-1. Дозиметр снабжен устройством звуковой сигнализации, срабатывающим, если значение измеряемого параметра превышает вычисленное значение ПДУ.

Для управления работой схемы и цифровой обработки информации в ЛАДИН применен микропроцессор. Микропроцессор запрограммирован на определение результатов измерений с учетом значений относительной спектральной чувствительности фотодиодов, установленных в ФПУ-1, ФПУ-2. Результаты измерений определяются на 13-ти рабочих длинах волн излучения в спектральном диапазоне 0,49 – 1,80 мкм.

Структурная схема дозиметра, приведенная на рисунке 4.13, реализует метод интегрирования с автосинхронизацией, подробно рассмотренный в п. 4.1.2. Блок преобразования дозиметра состоит из двух модулей: модуля 4 аналоговой обработки сигнала (МАО) и модуля 12 управления, вычисления, цифровой обработки и отображения информации (МЦО). В режиме измерения энергетической экспозиции от импульсного излучения схема работает следующим образом.

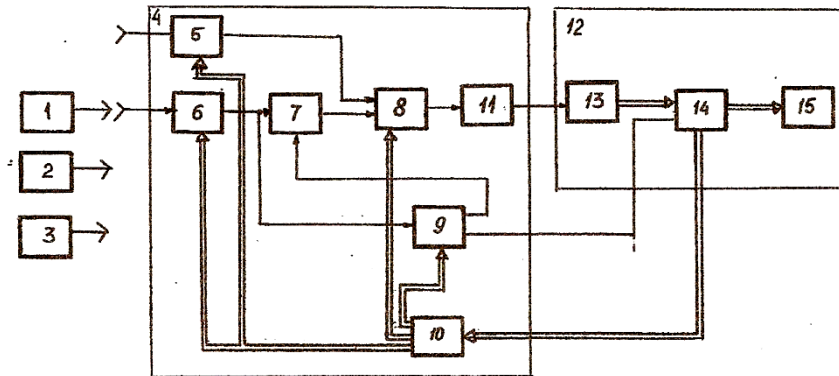


Рисунок 4.13 – Структурная схема лазерного дозиметра ЛАДИН: 1 – ФПУ-1; 2 – ФПУ-2; 3 – ФПУ-3; 4 – МАО; 5 – усилитель канала измерения облученности; 6 – усилитель канала измерения энергетической экспозиции; 7 – интегратор; 8 – мультиплексор переключения режима измерения; 9 – СФС; 10 – БУ; 11 – блок автоматического переключения диапазонов; 12 – МЦО; 13 – АЦП; 14 – микропроцессор; 15 – цифровой дисплей

Импульс фототока с ФПУ-1 или ФПУ-2 поступает на усилитель 6 канала измерения энергетической экспозиции. Входная цепь усилителя 6 представляет собой нагрузочную $R_n C_n$ -цепочку. Нагрузочные сопротивления входной цепи автоматически переключаются в зависимости от диапазона длин волн ЛИ. С выхода усилителя 6 сигнал поступает на интегратор 7, на выходе которого формируются импульсы напряжения с амплитудой пропорциональной энергетической экспозиции. С выхода интегратора 7 импульсы через мультиплексор 8 выбора режима измерений поступают на блок автоматического переключения 11, состоящий из трех параллельных усилителей с коэффициентами усиления 1, 10, 100, двух пороговых устройств, двух триггеров и мультиплексора. Триггеры управляют мультиплексором, на выход которого проходят сигналы либо с усилителя 1, либо с усилителя 2, либо с усилителя 3. С выхода усилителя 6 сигнал поступает также на блок СФС 9, в котором формируются импульсы выдержки и сброса.

В режиме измерения облученности от НЕПР ЛИ фотоприемные устройства подключаются к входу усилителя 5 канала измерения облученности. С выхода усилителя 5 сигнал поступает на мультиплексор переключения режима 8, на выходе которого формируются импульсы длительностью 100 мкс. Дальнейшее преобразование сигнала происходит аналогично тому, как было описано выше.

В состав МАО входит также блок управления 10 (БУ), который служит для приема последовательных кодов управления и преобразования их в параллельные. БУ принимает от МЦО последовательное кодовое слово, в котором первая часть соответствует виду контролируемого ЛИ (ИМП ЛИ или НЕПР ЛИ), вторая, третья и четвертая части соответствуют коду длины волны ЛИ, пятая и шестая части – коду диапазона длительностей импульсов. С выхода блока 11 сигнал поступает на АЦП (13). Последовательность импульсов с выхода АЦП поступает на программируемый микропроцессор 14. На входы управления микропроцессора поступают потенциалы с клавиш управления, расположенных на лицевой панели. К выходам микропроцессора подключен ЖК-дисплей, предназначенный для отображения информации о режимах измерений, результатах измерений и результатах вычисления ПДУ.

Микропроцессор запрограммирован таким образом, что с помощью клавиатуры управления можно выполнять следующие функции:

- индикацию текущего значения измеряемого параметра;
- индикацию максимального значения измеряемого параметра;
- индикацию значения суммарной энергетической экспозиции (дозы) от импульсного и непрерывного излучения;
- индикацию вида контролируемого излучения (импульсное или непрерывное);
- индикацию значения параметров контролируемого излучения: λ , $\tau_{и}$;
- индикацию значения времени воздействия контролируемого излучения;
- индикацию измеренного значения частоты повторения импульсов ЛИ;
- индикацию значения ПДУ, вычисленного либо в соответствии с СН [17], либо в соответствии со стандартом ИЕС-1;
- индикацию вида облучения, для которого вычисляются значения ПДУ (однократное или хроническое).

В таблице 3.3 Приложения 3 приведены основные технические характеристики многоцелевого лазерного дозиметра ЛАДИН.

4.2.4 Методы и средства поверки лазерных дозиметров

В конце 70-х и в начале 80-х годов для поверки лазерных дозиметров применялась разработанная соискателем методика поверки, основанная на использовании целой группы серийных лазеров, каждый из которых излучал на одной из рабочих длин волн поверяемых дозиметров. Практика поверки дозиметров ИЛД-2М и ЛДМ-2 показала, что использование группы лазеров в процессе поверки, как было регламентировано в разработанном автором нормативном документе РД 50-529 – 85 [35], доставляет существенные неудобства. Увеличиваются сроки и стоимость проведения поверки, а также возрастает необходимость постоянного контроля работоспособности лазеров и их периодического ремонта вплоть до замены дорогостоящих лазеров, выходящих из строя. Возникла необходимость разработки новой методики поверки, которая предполагала бы использование минимального количества лазерных излучателей.

Задача разработки такой методики стала особенно актуальной при внедрении в серийное производство дозиметра ЛАДИН, который должен быть откалиброван и поверен на 13-ти рабочих длинах волн. Соискателем была разработана новая методика поверки, которая была оформлена в виде нормативного документа Р 50.2.025 – 2002 «ГСИ. Дозиметры лазерные. Методика поверки» [36]. В соответствии с методикой [36] в процессе поверки определяют следующие метрологические характеристики:

- пределы основной относительной погрешности (ООП) дозиметра в режиме измерения облученности от непрерывного ЛИ на $\lambda = 0,63$ мкм и в спектральном диапазоне 0,49 – 1,80 мкм;
- пределы ООП дозиметра в режиме измерения энергетической экспозиции от импульсного излучения на $\lambda = 0,63$ мкм и в спектральном диапазоне 0,49 – 1,80 мкм;
- пределы ООП дозиметра в режиме измерения облученности от непрерывного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм.

Для определения пределов ООП дозиметра в режиме измерения облученности от непрерывного ЛИ на $\lambda = 0,63$ мкм собирают установку по схеме, приведенной на рисунке 4.14. В качестве эталонов второго разряда (образцовых средств измерения) в рассматриваемой схеме используются пирозлектрический цифровой ваттметр ПВЦ-2 (7) и лазерный дозиметр ЛД-4Э (6), представляющий собой улучшенный вариант дозиметра ЛД-4, в схемотехническом решении которого реализован МИА. Общий вид и технические характеристики ЛД-4 и ЛД-4Э приведены в Приложении 3. Соискатель принимал непосредственное участие в разработке технической документации на эти дозиметры и в проведении их государственных испытаний с целью утверждения типа.

Поверку проводят следующим образом.

Смещают в сторону заглушку 2 и через 30 с считывают показания $P_{0,63(1)}$ (Вт) с индикатора БПР 9 ваттметра 7 и показания $N_{0,63(1)}$ (в единицах отсчета) с дисплея дозиметра 11. Затем вычисляют коэффициент $m_{\text{ОБЛ}(1)}$ (Вт·см⁻²·ед⁻¹) по формуле

$$m_{\text{ОБЛ}(1)} = \frac{P_{0,63(1)}}{S_{\text{ВХ}} \cdot N_{0,63(1)}} = \frac{E_{\text{ПВЦ}(1)}}{N_{0,63(1)}}, \quad (4.37)$$

где $S_{\text{ВХ}}$ – площадь приемной поверхности приемника излучения в измерительной головке 8, равная 0,19 см²;

$E_{\text{ПВЦ}(1)}$ (Вт·см⁻²) – облученность плоскости AA' входного зрачка измерительной головки 8 ваттметра 7.

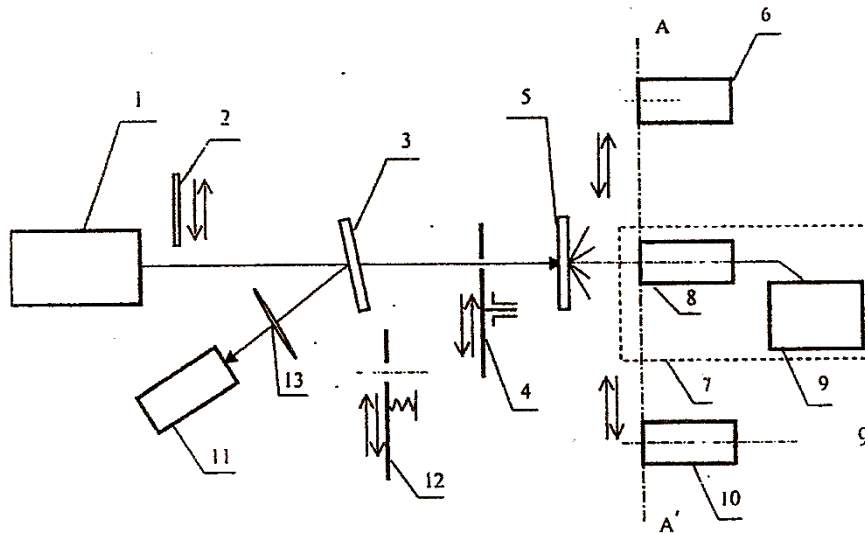


Рисунок 4.14 – Схема установки для поверки лазерных дозиметров на $\lambda = 0,63$ мкм: 1 – лазер ЛГ-126; 2 – заглушка; 3 – светоделительная пластина из стекла К-8; 4 – модулятор; 5 – рассеиватель излучения из молочного стекла МС-23; 6 – лазерный дозиметр ЛД-4Э; 7 – пирозлектрический цифровой ваттметр ПВЦ-2; 8 – измерительная головка ГИ-3 ваттметра ПВЦ-2; 9 – блок преобразования и регистрации ваттметра ПВЦ-2; 10 – поверяемый лазерный дозиметр; 11 – лазерный дозиметр ЛД-4 (прибор-свидетель); 12 – фотозатвор; 13 – линза; AA' – плоскость установки входного зрачка лазерного дозиметра ЛД-4Э, измерительной головки ГИ-3 ваттметра ПВЦ-2 и ФПУ-1 поверяемого лазерного дозиметра

Смещают в сторону от оптической оси измерительную головку 8, устанавливают на ее место ФПУ поверяемого дозиметра 10 так, чтобы плоскость входного зрачка ФПУ располагались в плоскости AA', а центр входного зрачка находился на оптической оси. Устанавливают диск модулятора 4 в положение, при котором пучок излучения проходит через отверстие в диске, и устанавливают показания поверяемого дозиметра на ноль.

Смещают в сторону заглушку 2 и через 30 с снимают показания $E_{\text{ЛД}0,63(1)}$ с дисплея поверяемого дозиметра 10 и показания $N_{0,63(2)}$ с дисплея дозиметра 11. Вычисляют коэффициент $l_{\text{ОБЛ}(1)}$ (Вт·см⁻²·ед⁻¹) по формуле

$$l_{\text{ОБЛ}(1)} = \frac{E_{\text{ЛД}0,63(1)}}{N_{0,63(2)}}. \quad (4.38)$$

Вычисляют первую реализацию неисключенной систематической погрешности (НСП) дозиметра $\delta_{\text{Н ОБЛ } 0,63(1)}$ (%) по формуле

$$\delta_{\text{Н ОБЛ } 0,63(1)} = 100 \left(1 - \frac{l_{\text{ОБЛ}(1)}}{m_{\text{ОБЛ}(1)}} \right). \quad (4.39)$$

Повторяют вышеперечисленные операции еще четыре раза и определяют значения $\delta_{\text{Н ОБЛ } 0,63(i)}$ (%). Затем вычисляют среднее значение НСП $\bar{\delta}_{\text{Н ОБЛ } 0,63}$ (%) по формуле

$$\bar{\delta}_{\text{Н ОБЛ } 0,63} = 0,2 \sum_{i=1}^5 \delta_{\text{Н ОБЛ } 0,63(i)}. \quad (4.40)$$

Вычисляют среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей ООП дозиметра $\sigma[\Delta]_{\text{ОБЛ } 0,63}$ (%) по формуле

$$\sigma[\Delta]_{\text{ОБЛ } 0,63} = \pm t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\delta_{\text{Н ОБЛ } 0,63(i)} - \bar{\delta}_{\text{Н ОБЛ } 0,63})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.41)$$

где n – количество измерений ($n = 5$);

t – коэффициент Стьюдента для $n = 5$ при доверительной вероятности $P = 0,95$ ($t = 2,78$).

Вычисляют пределы ООП дозиметра $\delta_{\text{ОБЛ } 0,63}$ (%) в режиме измерений облученности от непрерывного ЛИ на длине волны 0,63 мкм по формуле

$$\delta_{\text{ОБЛ } 0,63} = \pm \sqrt{\delta_{\text{ПВЦ}}^2 + \bar{\delta}_{\text{Н ОБЛ } 0,63}^2 + \sigma[\Delta]_{\text{ОБЛ } 0,63}^2}, \quad (4.42)$$

где $\delta_{\text{ПВЦ}}$ (%) – пределы ООП ваттметра 7, определенные при его поверке на рабочем эталоне средней мощности непрерывного лазерного излучения 1-го разряда.

Пределы ООП дозиметра в режиме измерения облученности на рабочих длинах волн $\delta_{\text{ОБЛ } \lambda}$, %, в спектральном диапазоне 0,49 – 1,80 мкм вычисляют по формуле

$$\delta_{\text{ОБЛ } \lambda} = \pm \sqrt{\delta_{\text{ОБЛ } 0,63}^2 + \delta_{\text{СП}}^2}, \quad (4.43)$$

где $\delta_{\text{СП}}$ (%) – пределы ООП измерения относительной спектральной чувствительности фотоприемника излучения поверяемого дозиметра.

Значения относительной спектральной чувствительности фотоприемника, а также значения $\delta_{\text{СП}}$ должны быть указаны в эксплуатационной документации дозиметра.

Для определения ООП дозиметра в режиме измерения энергетической экспозиции от импульсного лазерного излучения на $\lambda = 0,63$ мкм также используют установку, схема которой приведена на рисунке 4.14. Поверку проводят следующим образом. Смещают в сторону от оптической оси модулятор 4 и поверяемый дозиметр 10 или его ФПУ, устанавливая на оси фотозатвор 12 и дозиметр 6. Готовят дозиметр 6, дозиметр 11 и

поверяемый дозиметр 10 к работе в режиме измерений энергетической экспозиции на $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. Устанавливают на фотозатворе 12 длительность выдержки равную $1/125 \text{ с}$.

Смещают в сторону заглушку 2, взводят фотозатвор 12, нажимают его кнопку спуска и считывают значение энергетической экспозиции $H_{0,63(1)}$ ($\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}$), с дисплея дозиметра 6 и показания $M_{0,63(1)}$ (в единицах отсчета) с дисплея дозиметра 11. Вычисляют коэффициент $m_{\text{ЭКС}(1)}$ ($\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ед}^{-1}$), по формуле

$$m_{\text{ЭКС}(1)} = \frac{H_{0,63(1)}}{M_{0,63(1)}}. \quad (4.44)$$

Смещают в сторону от оптической оси дозиметр 6 и устанавливают на его место ФПУ поверяемого дозиметра 10 так, чтобы плоскость входного зрачка ФПУ была расположена в плоскости AA', а центр входного зрачка находился на оптической оси. Взводят фотозатвор 12, нажимают его кнопку спуска и считывают значение энергетической экспозиции $H_{\text{ЛД } 0,63(1)}$ ($\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}$), с дисплея дозиметра 10 и показания $M_{0,63(2)}$ дозиметра 11. Вычисляют коэффициент $l_{\text{ЭКС}(1)}$ ($\text{Дж}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ед}^{-1}$), по формуле

$$l_{\text{ЭКС}(1)} = \frac{H_{\text{ЛД } 0,63(1)}}{M_{0,63(2)}}. \quad (4.45)$$

Вычисляют первую реализацию НСП дозиметра $\delta_{\text{Н ЭКС } 0,63(i)}$ (%), по формуле (4.39), в которую подставляют значения $m_{\text{ЭКС}(1)}$, $l_{\text{ЭКС}(1)}$ вместо значений $m_{\text{ОБЛ}(1)}$, $l_{\text{ОБЛ}(1)}$. Повторяют вышеперечисленные операции еще четыре раза и определяют значения $\delta_{\text{Н ЭКС } 0,63(i)}$ (%). Затем вычисляют среднее значение НСП $\bar{\delta}_{\text{Н ЭКС } 0,63}$ (%) по формуле (4.40), в которую подставляют значения $\delta_{\text{Н ЭКС } 0,63(i)}$ вместо значений $\delta_{\text{Н ОБЛ } 0,63(i)}$.

Вычисляют СКО случайной составляющей ООП дозиметра $\sigma[\Delta]_{\text{ЭКС } 0,63}$ (%), по формуле (4.41), в которой используют параметры $\delta_{\text{Н ЭКС } 0,63(i)}$, $\bar{\delta}_{\text{Н ЭКС } 0,63}$.

Затем вычисляют пределы ООП дозиметра $\delta_{\text{ЭКС } 0,63}$ (%), в режиме измерения энергетической экспозиции от импульсного ЛИ на $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ по формуле

$$\delta_{\text{ЭКС } 0,63} = \pm \sqrt{\delta_{\text{ЛД}}^2 + \bar{\delta}_{\text{Н ЭКС } 0,63}^2 + \sigma[\Delta]_{\text{ЭКС } 0,63}^2}, \quad (4.46)$$

где $\delta_{\text{ЛД}}$ (%) – пределы ООП дозиметра 6 в режиме измерения энергетической экспозиции от импульсного лазерного излучения, определенные при его проверке с помощью рабочего эталона энергии импульса лазерного излучения.

Пределы ООП дозиметра в режиме измерения энергетической экспозиции от ИМП ЛИ на рабочих длинах волн $\delta_{\text{ЭКС } \lambda}$ (%) в спектральном диапазоне $0,49 - 1,80 \text{ мкм}$ вычисляют по формуле (4.43), в которую подставляют значения $\delta_{\text{ЭКС } 0,63}$ вместо $\delta_{\text{ОБЛ } 0,63}$.

Для определения ООП дозиметра в режиме измерения облученности от непрерывного лазерного излучения на $\lambda = 10,6$ мкм собирают установку по схеме, приведенной на рисунке 4.15. Поверку проводят следующим образом.

Смещают в сторону заглушку 2 и через 1 мин считывают показания $P_{10(1)}$ (Вт), с индикатора БПР 10 измерителя 8 и показания $N_{10,6(1)}$ с индикатора БПР 4 измерителя 3. Затем вычисляют коэффициент $m_{10,6(1)}$ (Вт·см⁻²·дел⁻¹) по формуле (4.37), в которую подставляют значения $P_{10,6(1)}$, $N_{10,6(1)}$ вместо значений $P_{0,63(1)}$, $N_{0,63(1)}$ и $E_{ИМО(1)}$ вместо $E_{ПВЦ(1)}$. В рассматриваемой схеме поверки $E_{ИМО(1)}$ – облученность плоскости AA' диафрагмы 11, $S_{ВХ}$ – площадь отверстия диафрагмы 11 равная 1 см². Смещают в сторону измерительную головку 9 вместе с диафрагмой 11 и устанавливают на их место поверяемый дозиметр 7 или его ФПУ так, чтобы плоскость его входного зрачка находилась в плоскости AA', а центр входного зрачка – в точке, где располагался центр отверстия диафрагмы 11.

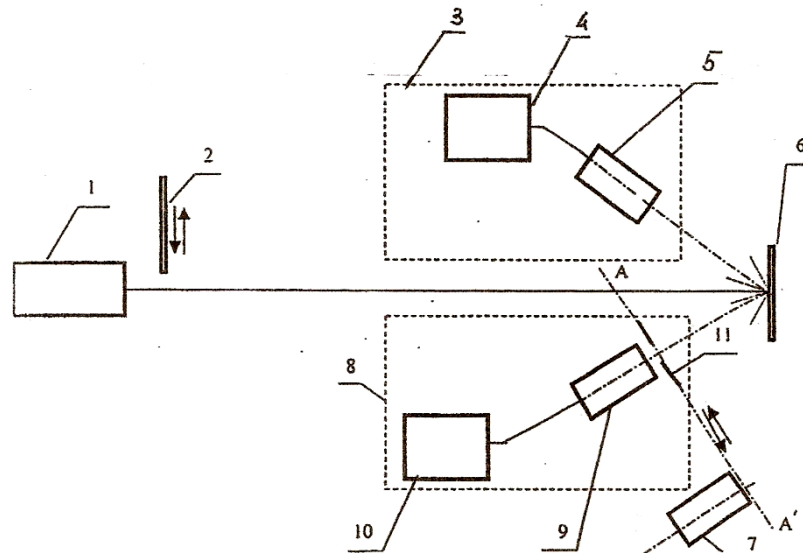


Рисунок 4.15 – Схема установки для поверки лазерных дозиметров на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм: 1 – лазер ЛГН-103; 2 – заглушка; 3 – измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н (прибор-свидетель); 4 – блок преобразования и регистрации; 5 – измерительная головка; 6 – металлический отражатель; 7 – поверяемый лазерный дозиметр; 8 – измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО – 2Н; 9 – измерительная головка; 10 – блок преобразования и регистрации; 11 – диафрагма; AA' – плоскость установки входного зрачка диафрагмы и фотоприемного устройства поверяемого лазерного дозиметра

Смещают в сторону заглушку 2 и через 1 мин считывают показания $E_{ЛД 10,6(1)}$ с дисплея поверяемого дозиметра 7 и $N_{10,6(2)}$ с индикатора БПР 4 измерителя 3. Затем вычисляют коэффициент $l_{10,6(1)}$ по формуле (4.38), в которую подставляют значения $E_{ЛД 10,6(1)}$ и $N_{10,6(2)}$ вместо значений $E_{ЛД 0,63(1)}$ и $N_{0,63(2)}$. Вычисляют НСП дозиметра $\delta_{Н 10,6(1)}$ (%) по формуле (4.39), в которую подставляют значения $l_{10,6(1)}$ и $m_{10,6(1)}$ вместо значений $m_{Обл(1)}$, $l_{Обл(1)}$. Повторяют вышеперечисленные операции еще четыре раза и определяют значения

$\delta_{Н 10,6(i)}$ (%). Затем вычисляют среднее значение НСП $\bar{\delta}_{Н 10,6}$ (%) по формуле (4.40), в которую подставляют значения $\delta_{Н 10,6(i)}$ вместо значений $\delta_{Н ОБЛ 0,63(i)}$.

Вычисляют СКО случайной составляющей ООП дозиметра $\sigma[\Delta]_{10,6}$ (%) по формуле (4.41), в которую подставляют значения $\delta_{Н 10,6(i)}$, $\bar{\delta}_{Н 10,6}$ вместо $\delta_{Н ОБЛ 0,63(i)}$, $\bar{\delta}_{Н ОБЛ 0,63}$. Затем вычисляют пределы ООП дозиметра $\delta_{10,6}$ (%) в режиме измерения облученности от непрерывного ЛИ на длине волны 10,6 мкм по формуле

$$\delta_{10,6} = \pm \sqrt{\delta_{ИМО}^2 + \bar{\delta}_{Н 10,6}^2 + \sigma[\Delta]_{10,6}^2}, \quad (4.47)$$

где $\delta_{ИМО}$ (%) – пределы ООП измерителя 8, определенные при его поверке с помощью рабочего эталона средней мощности непрерывного лазерного излучения.

4.3 Методы дозиметрического контроля лазерного излучения на рабочих местах персонала, обслуживающего лазерные установки

4.3.1 Методы определения границ рабочей зоны оператора лазерной установки и зоны возможного повреждения глаз

Многолетняя практика проведения инструментального контроля безопасности ЛИ с помощью лазерных дозиметров показала, что основная трудность заключается в выборе точек контроля, в которые следует помещать центр входного окна ЛД при оценке СОЛ на рабочих местах персонала, обслуживающего лазерные установки. В дальнейшем такой вид инструментального контроля, будем называть – «дозиметрический контроль лазерного излучения на рабочем месте» (ДК ЛИ на РМ).

Точки контроля следует выбирать на границе рабочей зоны (ГРЗ) оператора или на границе зоны возможного повреждения глаз (ГЗГ) оператора. Для определения ГРЗ или ГЗГ предварительно устанавливают границы зон досягаемости моторного поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях по ГОСТ 12.2.032 – 78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [101] и ГОСТ 12.2.033 – 78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования» [102]. Так, например, если оператор при выполнении служебных обязанностей находится постоянно в одном из рабочих положений («сидя», «стоя»), или в положениях «сидя – стоя» попеременно, то концы пальцев рук оператора при выполнении им основных и вспомогательных рабочих операций очерчивают границы зон досягаемости моторного поля

в положении «сидя» (см. позицию 4 на рисунке 4.16а, б) и в положении «стоя» (см. позицию 3 на рисунке 4.16а, б).

При ДК ЛИ на РМ рабочим положением оператора следует считать положение «сидя – стоя» попеременно. Если оператор не перемещается относительно лазерной установки в процессе выполнения основных и вспомогательных операций, его рабочее положение будем называть стационарным. В этом случае за ГРЗ принимают поверхность воображаемого цилиндра (см. позицию 6 на рисунке 4.16а, б), вертикальная ось симметрии которого проходит через условную точку, соответствующую центру лобной части головы оператора, находящегося в положении «сидя», а внутренняя поверхность является касательной к границе зоны досягаемости моторного поля в положении «стоя» в горизонтальной плоскости (см. рисунок 4.16б).

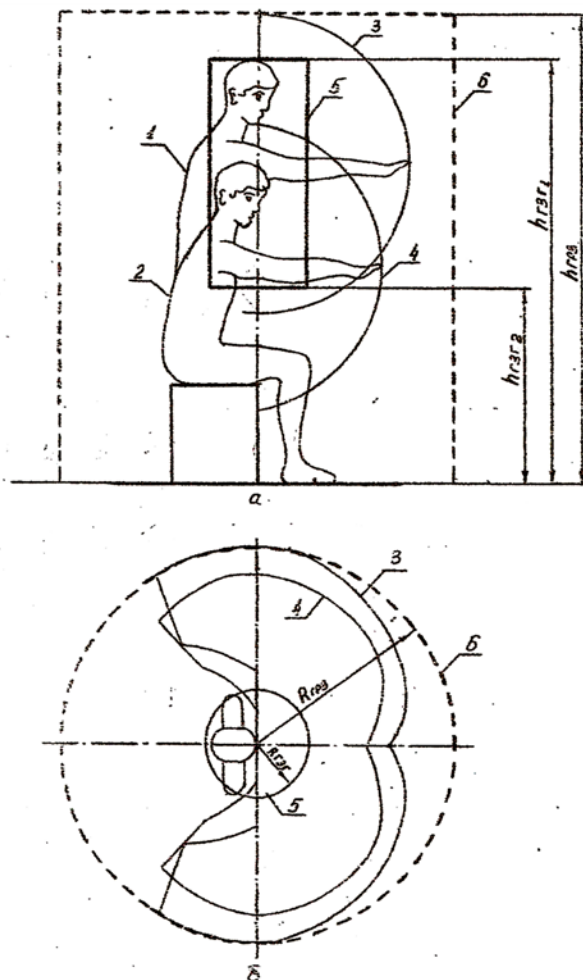


Рисунок 4.16 – Схемы определения ГРЗ и ГЗГ при стационарном рабочем положении оператора лазерной установки: а – схема в проекции на вертикальную плоскость; б – схема в проекции на горизонтальную плоскость; 1 – тело оператора в положении «стоя»; 2 – тело оператора в положении «сидя»; 3, 4 – границы зоны досягаемости моторного поля; 5 – ГЗГ; 6 – ГРЗ

За верхнюю плоскость цилиндра принимают плоскость касательную к границе зоны досягаемости моторного поля в положении «стоя» в вертикальной плоскости и проходящую через верхнюю точку этой зоны (см. рисунок 4.16а). За нижнюю плоскость цилиндра принимают плоскость пола помещения. Радиус цилиндра $R_{ГРЗ}$ (см) вычисляют по формуле $R_{ГРЗ} = 0,5h_p$, где h_p (см) – рост оператора. Расстояние от плоскости пола до верхней плоскости цилиндра $h_{ГРЗ}$ (см) вычисляют по формуле $h_{ГРЗ} = 1,3h_p$.

Для определения ГЗГ оператора лазерной установки предварительно устанавливают крайние положения зрачков глаз оператора при выполнении им основных и вспомогательных операций на конкретном рабочем месте.

При этом, если оператор при выполнении всех операций находится в стационарном рабочем положении, а зрачки его глаз перемещаются за счет

наклонов и поворотов головы и туловища, радиус цилиндра $R_{ГЗГ}$ принимают равным 20 см,

т.е. примерно равным расстоянию от оси симметрии до наиболее удаленной точки, в которой могут оказаться зрачки глаз оператора при выполнении им основных и вспомогательных операций. Расстояние от плоскости пола до верхней плоскости цилиндра $h_{ГЗГ1}$ (см) выбирают равным росту оператора h_P , а расстояние от плоскости пола до нижней плоскости цилиндра $h_{ГЗГ2}$ (см) вычисляют по формуле $h_{ГЗГ2} = 0,6h_P$.

Если оператор перемещается относительно лазерной установки в процессе выполнения основных и вспомогательных операций, рабочее место оператора будем называть нестационарным. В этом случае за ГРЗ, ГЗГ примем воображаемые плоские поверхности касательные к смежным цилиндрическим поверхностям, соответствующим ГРЗ, ГЗГ для различных стационарных рабочих положений оператора. Пример построения ГРЗ и ГЗГ в горизонтальной проекции для рассматриваемого случая приведен на рисунке 4.17, на котором ГРЗ изображена пунктирной линией, а ГЗГ – сплошной линией.

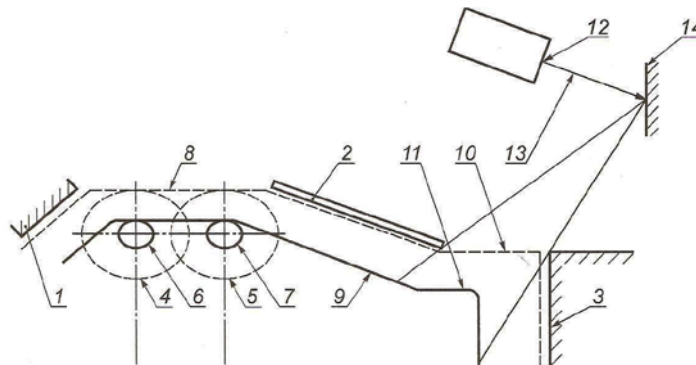


Рисунок 4.17 – Схема рабочего места оператора лазерной установки и схема определения ГРЗ и ГЗГ в проекции на горизонтальную плоскость для нестационарного рабочего положения оператора:
 1 – поверхность пульта управления; 2 – защитный экран; 3 – участок стены помещения; 4, 5 – ГРЗ для двух стационарных рабочих положений оператора; 6, 7 – ГЗГ для двух стационарных рабочих положений оператора; 8 – ГРЗ для нестационарного рабочего положения оператора; 9 – ГЗГ для нестационарного рабочего положения оператора; 10, 11 – участки ГРЗ и ГЗГ, на которые попадает диффузно отраженное лазерное излучение; 12 – выходное окно излучателя лазерной установки; 13 – ось лазерного пучка; 14 – диффузно отражающая поверхность мишени

4.3.2 Порядок выбора точек дозиметрического контроля

Перед началом дозиметрического контроля следует рассмотреть возможность попадания в пределы ГРЗ и ГЗГ зеркально отраженных лазерных пучков и зеркальных составляющих диффузно отраженного лазерного излучения. В случае, если установлена возможность попадания в пределы ГРЗ и ГЗГ указанных видов ЛИ, следует выбрать количество и местонахождение точек контроля (ТК) с учетом мощности (энергии) лазерного излучения и спектрального диапазона работы ЛТУ, исходя из следующих соображений:

- при работе на ЛТУ II класса опасности по СН 5804 [17] и 1М – 3R по СанПин [18], работающих в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм, выбор ТК проводят только с целью оценки СОЛ для глаз оператора (т.е. выбирают точки контроля только на ГЗГ).

- при работе на ЛТУ III или IV классов по СН [17] и 3В, 4 по СанПин [18], независимо от спектрального диапазона выбор ТК проводят как с целью оценки СОЛ для глаз, так и с целью оценки СОЛ для кожи (т.е. выбирают ТК как на ГРЗ так и на ГЗГ).

Будем принимать за потенциальные ТК точки пересечения осей зеркально отраженных лазерных пучков и осей зеркальных составляющих диффузно отраженного ЛИ (ДИФ ЛИ) с ГРЗ и ГЗГ. ТК для ДИФ ЛИ следует выбирать только в том случае, когда оси зеркально отраженных лазерных пучков не пересекают ГРЗ и ГЗГ. Точки контроля для ДИФ ЛИ следует выбирать только для ЛТУ III и IV классов по СН и 3В, 4 по СанПин.

Рассмотрим для примера методику выбора ТК для случая вертикального падения лазерного пучка на горизонтально расположенную диффузно отражающую поверхность и стационарного РМ (т.е. для цилиндрической ГРЗ или ГЗГ). Используем пространственную схему, показанную на рисунке 4.18. Точка $O_{ГЗ}$ является точкой пересечения оси ГРЗ (ГЗГ) с плоскостью мишени XOY . Точка $O_{ГРЗ}$ является точкой пересечения оси ГРЗ (ГЗГ) с плоскостью пола помещения.

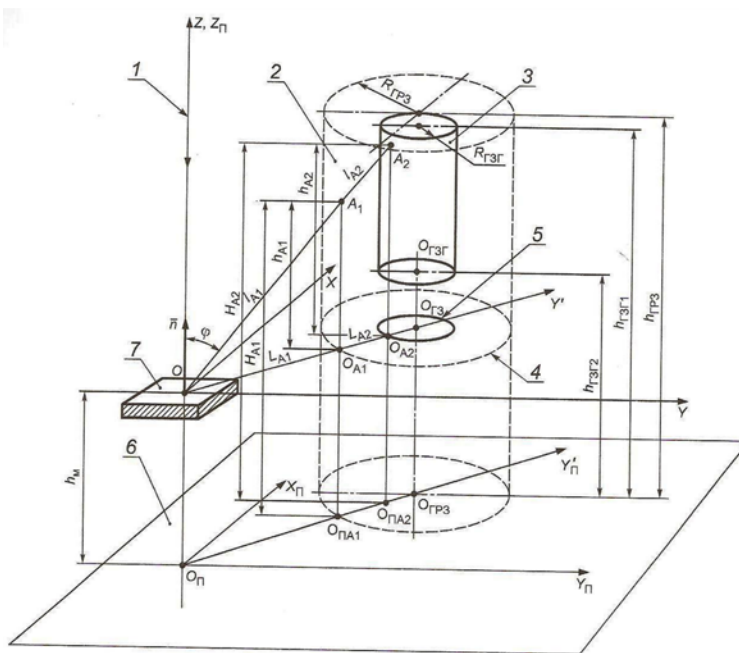


Рисунок 4.18 – Схема выбора точек контроля для случая вертикального падения лазерного пучка на горизонтально расположенную диффузно отражающую поверхность мишени и стационарного рабочего места оператора: 1 – ось вертикально падающего лазерного пучка; 2 – ГРЗ; 3 – ГЗГ; 4 – контур проекции ГРЗ на плоскость мишени; 5 – контур проекции ГЗГ на плоскость мишени; 6 – плоскость пола; 7 – диффузно отражающая поверхность мишени

Методику выбора ТК для случая вертикального падения лазерного пучка на горизонтально расположенную диффузно отражающую поверхность и нестационарного РМ (т.е. для плоской ГРЗ или ГЗГ) рассмотрим на примере пространственной схемы, показанной на рисунке 4.19. **Случаи взаимного расположения вертикально падающего на мишень лазерного пучка и РМ, показанные на рисунках 4.18, 4.19, наиболее характерны для ЛТУ, работающих с**

открытым лазерным излучением, используемых в транспортном машиностроении (см. рисунки А.2, А.3, А.6).

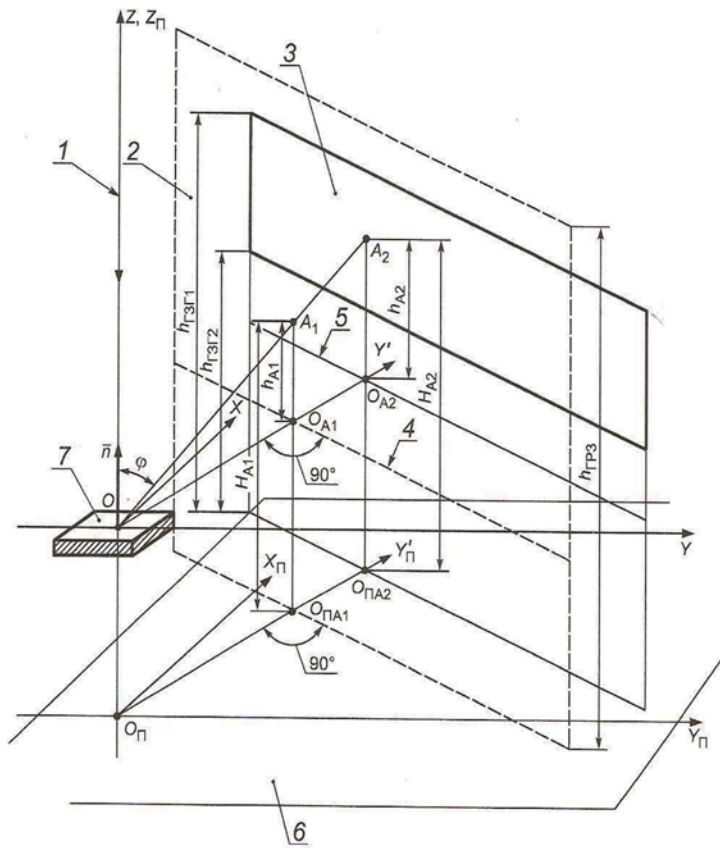


Рисунок 4.19 – Схема выбора точек контроля для случая вертикального падения лазерного пучка на горизонтально расположенную диффузно отражающую поверхность мишени и нестационарного рабочего места оператора: 1 – ось вертикально падающего лазерного пучка; 2 – ГРЗ; 3 – ГЗГ; 4 – проекция ГРЗ на плоскость мишени; 5 – проекция ГЗГ на плоскость мишени; 6 – плоскость пола; 7 – диффузно отражающая поверхность мишени

падающего лазерного пучка с плоскостью пола помещения; плоскость $X_p Y_p Z_p$ совпадала с плоскостью пола, а ось Z_p была направлена вверх вдоль оси падающего пучка и оси Z . Точки O_{A1} , O_{A2} являются проекциями точек контроля A_1 , A_2 на плоскость XOY а точки $O_{пA1}$, $O_{пA2}$ – проекциями точек контроля A_1 , A_2 на плоскость $X_p O_p Y_p$. Точки контроля A_1 , A_2 на ГРЗ (ГЗГ) на рисунках 4.19, 4.20 – это точки, для которых предполагается, что облученность (энергетическая экспозиция) малой площадки вокруг A_1 , A_2 от диффузно отраженного излучения мишени максимальна. Эти точки являются точками пересечения линий OA_1 , OA_2 , идущих под углом $\varphi = 45 \pm 2$ угл. град. к нормали \bar{n} в плоскости ZOY' [27].

В случае цилиндрических ГРЗ и ГЗГ следует измерить на конкретном РМ с помощью лазерного дальномера-рулетки (ЛДР) или измерительной рулетки длину L_0 отрезка $O_p O_{ГРЗ}$. Длины отрезков $O_p O_{пA1}$ (L_{A1}) и $O_p O_{пA2}$ (L_{A2}) можно вычислить по формулам

$$L_{A1} = L_0 - R_{ГРЗ}, \tag{4.48}$$

Система координат XYZ на рисунках 4.18, 4.19 выбрана таким образом, чтобы начало координат располагалось в точке O пересечения оси падающего лазерного пучка с плоскостью мишени; плоскость XOY совпадала с плоскостью мишени а ось Z была направлена вверх вдоль оси падающего пучка. Система координат $X_p Y_p Z_p$ на рисунках 4.18, 4.19 выбрана таким образом, чтобы начало координат располагалось в точке O_p пересечения оси

$$L_{A2} = L_0 - R_{ГЗГ}. \quad (4.49)$$

В случае плоских ГРЗ и ГЗГ следует измерить на конкретном РМ с помощью ЛДР или измерительной рулетки длину L_{A1} отрезка $O_{\Pi} O_{\Pi A1}$. Длину L_{A2} отрезка $O_{\Pi} O_{\Pi A2}$ можно вычислить по формуле $L_{A2} = L_{A1} + (R_{ГРЗ} - R_{ГЗГ})$. Полученные значения L_{A1} , L_{A2} позволяют нанести ГРЗ (ГЗГ) на схему РМ, выполненную в выбранном масштабе в вертикальной проекции на плоскость $Z_{\Pi} O_{\Pi} Y'_{\Pi}$.

На схемах РМ проводим линию $O A_2$ под углом $\varphi = 45$ угл. град. к нормали \bar{n} . Точки A_1, A_2 , являющиеся точками пересечения линии $O A_2$ с линиями проекции поверхностей ГРЗ (ГЗГ) на плоскость $Z_{\Pi} O_{\Pi} Y'_{\Pi}$, принимаем за изображения точек контроля. Используя выбранный масштаб, вычисляем расстояния h_{A1}, h_{A2} (см) от точек A_1, A_2 до плоскости XOY по формулам: $h_{A1} = L_{A1}$, $h_{A2} = L_{A2}$. С помощью ЛДР или рулетки измеряем расстояние h_M от плоскости мишени до плоскости пола. Вычисляем расстояния H_{A1}, H_{A2} от точек контроля A_1, A_2 до плоскости пола по формулам: $H_{A1} = h_{A1} + h_M$; $H_{A2} = h_{A2} + h_M$.

На реальном РМ откладываем с помощью измерительной рулетки отрезки длиной L_{A1}, L_{A2} вдоль линии $O_{\Pi} O_{ГРЗ}$ для схемы, приведенной на рисунке 4.18, и вдоль линии $O_{\Pi} O_{\Pi A1}$ для схемы, приведенной на рисунке 4.19. С помощью измерительной рулетки из точек, соответствующих концам отложенных отрезков, откладываем перпендикулярно вверх от плоскости $X_{\Pi} O_{\Pi} Y_{\Pi}$ расстояния H_{A1}, H_{A2} и фиксируем искомые точки контроля A_1, A_2 . В выбранные точки контроля следует поместить центр входного окна ФПУ лазерного дозиметра и провести измерения в соответствии с его инструкцией по эксплуатации.

Завершая рассмотрение методики выбора ТК для случая вертикального падения лазерного пучка на горизонтально расположенную диффузно отражающую поверхность, следует заметить, что соискателем разработаны также методики выбора ТК для случая горизонтального падения лазерного пучка на вертикально расположенную диффузно отражающую поверхность. Кроме того, разработаны также методики выбора ТК для мишени, произвольно ориентированной в пространстве относительно оси падающего лазерного пучка. Все перечисленные методики оформлены автором в виде приложений к ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 [34].

4.4 Результаты и выводы по материалам главы 4

1. Разработаны требования к средствам инструментального контроля безопасности лазерного излучения – лазерным дозиметрам, основанные на учете гигиенических норм лазерного излучения, регламентированных в СН 5804 – 91.

2. Предложен метод интегрирования с автосинхронизацией, на основе которого разработаны схемотехнические решения серийных лазерных дозиметров: ИЛД-2М, ЛДМ-2, ЛАДИН, внесенных в Государственный реестр средств измерений под номерами: 7845-80, 11216-88, 16028-03; лазерные дозиметры указанных марок широко применялись и применяются в практике инструментального контроля лазерного излучения.

3. Разработаны и внедрены методы поверки лазерных дозиметров и единые методики проведения дозиметрического контроля лазерного излучения на рабочих местах, что позволило обеспечить единство измерений в области лазерной безопасности.

4. Требования к лазерным дозиметрам и методики проведения дозиметрического контроля на рабочих местах вошли в разработанный при непосредственном участии соискателя стандарт ГОСТ Р 12.1.031 – 2010 «Система стандартов безопасности труда. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения».

5. По материалам главы 4 соискателем в соавторстве опубликованы научные статьи в журналах «Измерительная техника» [104], «Безопасность в техносфере» [110]; в сборниках статей «Оптико-физические измерения» [103], «Импульсная фотометрия» [46], «Дозиметрия лазерного излучения» [105, 106]; в справочнике «Измеряемые параметры физических опасных и вредных производственных факторов» [108], а также опубликована брошюра (препринт ФИАН им. П. Н. Лебедева) [107] и каталог приборов дозиметрического контроля лазерного и ультрафиолетового излучения [109]. Схемотехнические решения, реализующие разработанный соискателем метод интегрирования с автосинхронизацией, признаны изобретениями, на которые получены авторские свидетельства [30 – 32] и патент [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных в первой главе исследований современного состояния нормативной базы в области лазерной безопасности выявлены следующие несоответствия:

- гигиенических норм лазерного излучения, регламентированных в «Санитарных нормах и правилах устройства и эксплуатации лазеров» СН № 5804 – 91, в СанПин 2.2.4.3359 «Санитарно-эпидемиологических требованиях к физическим факторам на рабочих местах» и норм ЛИ, регламентированных в стандарте IEC 60825-1:2007 «Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements» и в идентичном ему стандарте ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования требования и руководство для пользователей»; значения ПДУ, установленные в СН 5804 и СанПин 2.2.4.3359 для наиболее опасной для глаз области спектра 380 – 600 нм, на порядок меньше значений ПДУ (MPE), установленных в IEC 60825 и ГОСТ IEC 60825-1;

- классификационных уровней потенциальной опасности лазерных изделий, регламентированных в СН 5804, и уровней, регламентированных в IEC 60825, ГОСТ IEC 60825-1 и ГОСТ 31581 – 2012 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий».

Для устранения противоречий предлагаются следующие мероприятия:

- безусловное сохранение действующих ПДУ по СН 5804 в новых санитарно-гигиенических нормативных документах по ЛБ (предложение реализовано: в новых СанПин 2.2.4.3359 регламентированы ПДУ идентичные установленным в СН 5804);

- ограничение области действия ГОСТ IEC-1 лишь лазерной продукцией, предназначенной для экспорта (предложение опубликовано и обосновано в работах [23, 76, 92]);

- разработка вместо ГОСТ 31581 нового национального стандарта по ЛБ, гармонизированного с СН 5804 и СанПин 2.2.4.3359 в части ПДУ, используемых при классификации ЛИЗ (предложение опубликовано и обосновано в работах [21, 74 – 76, 80]).

2. По результатам исследований, приведенных во второй главе:

- предложена общая модель оценки степени опасности лазерного излучения, генерируемого лазерными источниками с различными видами оптических полей;

- введено понятие «коэффициент степени опасности лазерного излучения», позволяющий проводить с его помощью специальную оценку условий труда людей, находящихся в оптических полях лазерного излучения разного вида; предложена таблица определения классов (подклассов) условий труда по степени вредности и опасности при

воздействии ЛИ, использующая максимальные значения коэффициентов степени опасности лазерного излучения для хронического и однократного воздействия ЛИ;

- выведены формулы, описывающие распределение энергетической экспозиции сетчатки глаза при его облучении лазерным пучком; показано, что наибольшее значение энергетической экспозиции (облученности) сетчатки лазерным излучением соответствует наиболее опасному случаю острой фокусировки гауссова пучка и аккомодации глаза на плоскость, находящуюся вблизи перетяжки исходного пучка; при острой фокусировке на сетчатке формируется пятно облученности с минимальным диаметром 10 мкм (модель наиболее неблагоприятной фокусировки учтена при разработке ПДУ лазерного излучения, регламентированных в СН 5804 – 91 и СанПин 2.2.4 3359 – 16).

- разработаны упрощенные расчетные методы оценки СОЛ для лазерных пучков в ближней, средней и дальней зонах их распространения; результаты вычислений коэффициентов степени опасности ЛИ и расстояний до границ лазерно опасных зон позволяют оценить степень опасности излучений лазерных изделий, применяемых на открытых пространствах, для водителей наземных транспортных средств и пилотов воздушных судов;

- проведена предварительная (расчетная) специальная оценка условий труда судоводителей и пилотов ВС при воздействии лазерных пучков, генерируемых лазерными навигационными системами «Анемон-3» и «Глиссада-М», а также водителей наземных ТС при воздействии пучков, генерируемых лазерными измерителями скорости марок «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М»; в результате ПСОУТ установлено, что при эксплуатации лазерных навигационных систем и измерителей скорости возможно возникновение вредных условий труда подкласса 3.2;

- проведена ПСОУТ водителей наземных ТС и пилотов ВС при воздействии лазерных пучков, генерируемых лазерными изделиями гражданского назначения (лазерными указками, лазерными прицелами, лазерными дальномерами-рулетками); наиболее неблагоприятные условия труда подкласса 3.4 и класса 4 возникают для водителей наземных транспортных средств при воздействии излучения лазерных указок мощностью более 10 мВт. При воздействии излучения лазерных указок мощностью более 20 мВт для пилотов ВС могут возникать вредные условия труда подклассов 3.3, 3.4.

3. В третьей главе приведены разработанные соискателем расчетные методы оценки степени ослепляющего действия лазерных пучков. Результаты вычисления значений расстояний до границы ЛОЗ и границы зоны ослепления лазером позволили установить пространственные параметры зон лазерной опасности для воздушных судов. Установлено, что расстояние от края взлетно-посадочной полосы до границы зоны вероятного

неблагоприятного воздействия ЛИ от наземного ЛИЗ равно 8 км, а поперечные размеры этой зоны равны 1 км в каждую сторону от оси ВПП; минимальная высота полета гражданского ВС, при которой возникает лазерная угроза безопасности полета, равна 500 м. Предложены организационно-технические мероприятия по снижению лазерной угрозы безопасности эксплуатации воздушных судов.

4. В четвертой главе приведены разработанные соискателем требования к средствам инструментального контроля безопасности лазерного излучения – лазерным дозиметрам, основанные на учете гигиенических нормативов лазерной безопасности, регламентированных в санитарно-гигиенических нормативных документах СН 5804 – 91 и СанПин 2.2.4.3359.

Предложен метод интегрирования с автосинхронизацией, позволивший разработать схемотехнические решения серийных лазерных дозиметров ИЛД-2М, ЛДМ-2, ЛАДИН, широко применявшихся и применяющихся в практике дозиметрического контроля лазерного излучения.

Разработанные соискателем методы поверки лазерных дозиметров и единые методики проведения дозиметрического контроля на рабочих местах позволили обеспечить единство измерений в области лазерной безопасности.

5. Рассматривая перспективы дальнейшей разработки темы обеспечения лазерной безопасности в транспортной отрасли, можно наметить следующие направления исследований и разработок:

- совершенствование санитарно-гигиенической нормативной базы в области ЛБ по результатам критического анализа результатов медико-биологических исследований по установлению ПДУ лазерного излучения, использованных при разработке СН 5804 – 91, с целью изучения возможности (или невозможности) увеличения значений ПДУ для их сближения со значениями МРЕ, регламентированными в ИЕС 60825-1 (предложение опубликовано и обосновано в работе [83]);

- совершенствование санитарно-гигиенической нормативной базы в области ЛБ в части доработки существующей схемы классификации ЛИЗ путем выделения некоторого класса (подкласса) лазерных изделий небольшой мощности (например, с диапазоном мощностей от 0,1 до 1,0 мВт), на который не будут распространяться жесткие ограничения по свободному применению (предложение опубликовано и обосновано в работах [82, 83]);

- разработка санитарно-гигиенического нормативного документа, регламентирующего гигиенические нормативы ослепляющего действия лазерного излучения;

- совершенствование технической нормативной базы в области ЛБ путем разработки серии новых национальных стандартов по ЛБ и путем ограничения области действия серии переведенных стандартов МЭК по ЛБ лишь лазерной продукцией, предназначенной для экспорта (предложение опубликовано и обосновано в работах [21, 74 – 76, 80]);

- разработка нового стандарта «ССБТ. Безопасность лазерной продукции. Расчетные и инструментальные методы лазерной дозиметрии на открытых пространствах» (предложение опубликовано и обосновано в работах [21, 74 – 76, 80]);

- внесение изменений в ГОСТ 31581 – 2012 в части классификационной схемы ЛИЗ с целью приведения схемы в соответствие требованиям СН 5804 – 91 (предложение опубликовано и обосновано в работах [82, 83]);

- разработка технического регламента по безопасности лазерной продукции, предусмотренного «дорожной картой» развития оптоэлектронных технологий;

- разработка лазерных дозиметров нового поколения, предназначенных для дозиметрического контроля ЛИ, генерируемого лазерными изделиями, предназначенными для работы на открытых пространствах; новые ЛД должны обладать способностью идентификации таких ЛИЗ как по спектральным, временным и частотным параметрам, так и по их местоположению в окружающем пространстве (предложение опубликовано и обосновано в работе [110]).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- БД ЛИ – биологическое действие лазерного излучения
- БЗ – ближняя зона
- БПР – блок преобразования и регистрации
- БУ – блок управления
- ВПП – взлетно-посадочная полоса
- ВС – воздушное судно
- ГБЗ – граница ближней зоны
- ГЗГ – граница зоны возможного повреждения глаз
- ГН ЛИ – гигиеническое нормирование лазерного излучения
- ГРЗ – границе рабочей зоны
- ДИФ ЛИ – диффузно отраженное лазерное излучение
- ДК ЛИ – дозиметрический контроль лазерного излучения
- ЗВЛ – зона вероятного неблагоприятного воздействия лазерного излучения на глаза пилота воздушного судна
- ЗВЛ О – зона вероятного неблагоприятного воздействия лазерного излучения на глаза пилота воздушного судна по критерию кратковременного ослепления пилота
- ЗВЛ П – зона вероятного неблагоприятного воздействия лазерного излучения на глаза пилота воздушного судна по критерию поражения сетчатки глаз пилота
- ЗОС – зона ослепляющего действия лазерного излучения
- ЗУЛ – зона нанесения ущерба зрению лазером
- ИИН – измеритель импульсных напряжений
- ИМ ЛИ – импульсно-модулированное лазерное излучение
- ИМП ЛИ – импульсное лазерное излучение в виде одиночных импульсов
- ИМПС ЛИ – импульсное лазерное излучение в виде серий импульсов
- ИНТ – интегратор
- КОСЛ – коэффициент ослепления лазерным излучением
- КСОЛ – коэффициент степени опасности лазерного излучения
- КУ – классификационный уровень
- ЛБ – лазерная безопасность
- ЛД – лазерный дозиметр
- ЛД-ИК – инфракрасный лазерный дальномер
- ЛДОЗ – лазерная дозиметрия

- ЛДР – лазерный дальномер-рулетка
- ЛДС ИК – инфракрасный лазерный дальномер-скоростемер
- ЛИ – лазерное излучение
- ЛИЗ – лазерное изделие
- ЛКГС – лазерная курсо-глиссадная система
- ЛМ – лазерный маяк
- ЛИС – лазерный измеритель скорости
- ЛОЗ – лазерно опасная зона
- ЛПД – лазерный полупроводниковый диод
- ЛПР – лазерный прицел
- ЛСМ – лазерный створный маяк
- ЛТУ – лазерная технологическая установка
- ЛУК – лазерная указка
- МАО – модуль аналоговой обработки сигнала
- МДЭ (МРЕ) – максимально допустимая экспозиция (maximum permissible exposure)
- МИА – метод интегрирования с автосинхронизацией
- МЦО – модуль управления, вычисления, цифровой обработки сигнала
- НВЛ – несанкционированное воздействие лазером
- НД – нормативный документ
- НЕПР ЛИ – непрерывное лазерное излучение
- НСП – неисключенная систематическая погрешность
- ОВЛ – область неблагоприятного воздействия лазерного излучения а глаза пилота
воздушного судна
- ОВЛ О – область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию
кратковременного ослепления пилота
- ОВЛ П – область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию
поражения сетчатки глаз пилота
- ООП – основная относительная погрешность
- ОПР – открытое пространство
- ОРТМ – организационно-технические мероприятия
- ОС – оптическая система
- ПВВА – полусфера вероятного воздействия
- ПДУ – предельно допустимый уровень
- ПДУ_{хр} – предельно допустимый уровень при хроническом воздействии
- ПДУ ОСЛ – предельно допустимый уровень ослепления лазерным излучением

- ПЗЛО ВС – параметр зоны лазерной опасности для воздушного судна
- ПЗП – плоскость земной поверхности
- ПИП – первичный измерительный преобразователь
- ПНРР – пуско-наладочные и ремонтные работы
- ПСОУТ – предварительная (расчетная) специальная оценка условий труда
- РМ – рабочее место
- СВВ_А – сфера вероятного воздействия
- СВЛ О – сфера вероятного воздействия лазерного излучения по критерию кратковременного ослепления пилота
- СВЛ П – сфера вероятного воздействия лазерного излучения по критерию поражения сетчатки глаз пилота
- СГ НД – санитарно-гигиенический нормативный документ
- СКИ – счетчик количества импульсов
- СКЛ – схема классификации
- СКО – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей ООП дозиметра
- СМЗ – счетчик максимальных значений сигнала
- СОУТ – специальная оценка условий труда
- СОЛ – степень опасности лазерного излучения
- СОСЛ ЛП – степень ослепления лазерным пучком
- СПИ – спектральный интервал
- СС – схема сравнения
- ССЗ – счетчик суммарных значений сигнала
- СТЗ – счетчик текущих значений сигнала
- СФС – схема формирования синхроимпульсов
- ТК – точка контроля
- ТС – транспортное средство
- ФД – фотодиод
- ФПУ – фотоприемное устройство
- ЦВЛ О – цилиндрическая область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию кратковременного ослепления пилота
- ЦВЛ П – цилиндрическая область вероятного воздействия лазерного излучения по критерию поражения сетчатки глаз пилота
- ЭКР – эквивалентный конфокальный резонатор
- ЭП ЛИ – энергетический параметр лазерного излучения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Развитие оптоэлектронных технологий (фотоники)». Распоряжение Правительства РФ № 1305-р от 24.07.2013.
2. Григорьянц А. Г. Лазерная техника и технология. Кн. 7. Лазерная резка металлов: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. – М.: Высш. шк., 1988. – 127 с.
3. Григорьянц А. Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и СО₂-лазеров / А. Григорьянц, А. Грезев, В. Грезев // Фотоника. – 2012. – № 35. – С. 38 – 43.
4. Технологические лазеры. Справочник в 2-х томах. Кол. авт. Под. ред. Абильтсеева Г. А. – М.: Машиностроение. 1992.
5. Игнатов А. Г. Российские лазерные технологии: состояние и перспективы / А. Г. Игнатов // РИТМ машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 26 – 40.
6. Лазерные технологии на службе у судостроителей [Электронный ресурс] – Режим доступа: sstc.spb.ru/news/lazer-technologies.pdf.
7. Степанова М. Лазерные технологии в автомобилестроении [Электронный ресурс] / М. Степанова – Режим доступа: mirprom.ru/public/lazernye-tehnologii-v-avtomobilestroenii.html.
8. ОАО МТЗ ТРАНСМАШ [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.mtz-transmach.ru/services/lazer/oborudovanie-lasenogo-centra.
9. Аснис Л. А. Лазерная дальнометрия / Л. А. Аснис и др. – М.: Радио и связь, 1995. – 256 с.
10. Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение / В. Е. Дементьев. – М.: Академический Проект, 2008. – 591 с.
11. Зуев В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В. Е. Зуев, В. В. Зуев. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – 231 с.
12. Инешин А. Д. Лазерные навигационные системы / А. Д. Инешин, Д. В. Маевский // Вестник Морского государственного университета. Вып. 5. Серия: Судовождение. – Владивосток: Мор. гос. ун-т. – 2008. – С. 82 – 88.
13. Миряха А. Полупроводниковые лазерные излучатели в курсо-глиссальной системе посадки воздушных судов / А. Миряха, М. Свердлов, Г. Жуков // Фотоника. – 2012. – № 3. – С. 32 – 37.
14. Лазерный измеритель скорости и дальности ЛИСД-2Ф [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.polus.info/production/speedometers/522844.

15. Хилов С. Лазерные проекционные системы для развлечений / С. Хилов, В. Хилов // Фотоника. – 2015 – № 6. – С. 38 – 47.
16. ГОСТ 12.1.040 – 83. Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения. – М.: Стандартиформ. – 8 с.
17. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров № 5804 – 91 (Утв. Зам. Главного государственного санитарного врача 31.07.1991).
18. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПин 2.2.4.3359 – 16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах (Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 21.06.2016 № 81).
19. ГОСТ ИЕС 60825-1 – 2013. Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования, требования и руководство для пользователей (ИЕС 60825-1:2007, IDT). – М.: Стандартиформ. – 76 с.
20. Желтов Г. И. Нормативы по лазерной безопасности: истоки, уровень, перспективы / Г. И. Желтов // Фотоника. – 2017. – №1. – С. 10 – 35.
21. Рахманов Б. Н. Нормативное и правовое регулирование безопасного применения лазерной техники / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Безопасность в техносфере. – 2013. – № 3. – С. 60 – 69.
22. Рахманов Б. Н. К 30-летию системы лазерной безопасности в России. Современные проблемы в области нормативного и правового регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Лазер-Информ. – 2013. – выпуск № 17 (512). – С. 1 – 6.
23. Рахманов Б. Н. К 30-летию системы лазерной безопасности в России. Современные проблемы в области нормативного и правового регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Лазер-Информ. – 2013. – выпуск № 18 (513). – С. 1 – 9.
24. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия / Р. А. Сапожников. – Л.: Энергия, 1967. – 268 с.
25. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / М. М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
26. Рахманов Б. Н. Лазеры. Защита и профилактика от их неблагоприятного воздействия. Часть 1 / Б. Н. Рахманов // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. – 2004. – № 6.

27. Рахманов Б. Н. Лазеры. Защита и профилактика от их неблагоприятного воздействия. Часть 2 / Б. Н. Рахманов // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. – 2005. – № 1.

28. Бурдаев Б. Я. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / Б. Я. Бурдаев, Р. А. Валитов М. А. Винокур и др. под ред. А. Ф. Котюка. – М.: Радио и связь. 1981. – 288 с.

29. Методика проведения специальной оценки условий труда. Утв. приказом Минтруда России от 24.01.2014 г., № 33н.

30. Кибовский В. Т. Устройство для измерения энергетических параметров световых импульсов / В. Т. Кибовский // Авт. св. №533832 от 07.07.1976.

31. Кибовский В. Т. Лазерный дозиметр / В. Т. Кибовский, П. А. Кузнецов, Б. Н. Рахманов // Авт. св. №1141846 от 22.10.1984.

32. Кармолин А. Л. Многоцелевой лазерный дозиметр / А. Л. Кармолин, В. Т. Кибовский, Б. Н. Рахманов и др. // Авт. св. №1571813 от 15.02.1990.

33. Кашуба В. А. Устройство оперативного дозиметрического контроля лазерного излучения опасного для глаз человека / В. А. Кашуба, В. Т. Кибовский, В. А. Григорьев // Патент SU 1817836 А от 23.05.93.

34. ГОСТ Р 12.1.031 – 2010. Система стандартов безопасности труда. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 46 с.

35. РД 50-529 – 85. Методические указания. Измеритель для лазерной дозиметрии ИЛД-2. Методы и средства поверки. – М.: Изд-во стандартов 1985. – 36 с.

36. Р 50.2.025 – 2002. Рекомендации по метрологии. Государственная система обеспечения единства измерений. Дозиметры лазерные. Методика поверки. – М.: Госстандарт России. – 17 с.

37. Климков Ю. М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами / Ю. М. Климков. – М.: Сов. Радио, 1978. – 264 с.

38. Тощакон Л. Н. Передача сигналов по линейным электрическим цепям / Л. Н. Тощакон. – Л.: Изд. ЛГУ, 1973. – 144 с

39. Гребенщиков И. И. Средства измерений для оптической дозиметрии / И. И. Гребенщиков, В. Т. Кибовский, В. И. Кухтевич // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. 2-ая Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – М.: Изд-во ВНИИОФИ, 1976. – С. 354, 355.

40. Кибовский В. Т. Лазерные дозиметры ИЛД-1, ИЛД-2 / В. Т. Кибовский, Ф. Х. Клычев, В. И. Кухтевич, Ш. А. Рубин, А. И. Кириллов, Б. С. Иванов // Применение

лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике. II Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1979. – С. 513, 514.

41. Кибовский В. Т. Некоторые вопросы метрологического обеспечения лазерной дозиметрии / В. Т. Кибовский, А. И. Кириллов, В. И. Кухтевич, В. И. Сачков // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов. III Всесоюзная научно-техническая конференция Тезисы докладов. – М.: Изд-во ВНИИОФИ, 1979. – С. 308.

42. Гаценко Л. С. Характеристики поверхностно-барьерных фотодиодов при импульсном облучении / Л. С. Гаценко, В. Т. Кибовский, Ф. Х. Клычев, Ш. А. Рубин // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. III Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – М.: Изд-во ВНИИОФИ, 1979. – С. 352.

43. Кибовский В. Т. К вопросу об оценке степени опасности направленных лазерных пучков / В. Т. Кибовский, В. И. Кухтевич, Л. А. Новицкий // Применение лазеров в науке и технике. Всесоюзная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1980. – С. 129.

44. Дюжева А. Я. Гигиеническая оценка условий труда и состояния здоровья медицинских работников контактирующих с лазерами / А. Я. Дюжева, А. А. Комарова, В. И. Кухтевич, В. Т. Кибовский, В. П. Башилов // Гигиенические аспекты использования лазерного излучения в народном хозяйстве. Сб. научных трудов. Под ред. член-корр. АМН СССР, проф. Шицковой А. П. – М.: МНИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана, 1982. – С. 32 – 35.

45. Кибовский В. Т. Современное состояние лазерной безопасности / В. Т. Кибовский, В. Е. Прокопенко // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. 19-ая Всероссийская конференция. Тезисы докладов. – М.: Изд-во ВНИИОФИ, 2008.

46. Гребенщиков И. И. Измерение энергии повторяющихся импульсов излучения методом интегрирования с автосинхронизацией / И. И. Гребенщиков, В. Т. Кибовский // Импульсная фотометрия. Сб. статей. Вып. 5. – Л.: Машиностроение, 1978. – С. 89 – 93.

47. Zaret M. M. Ocular lesions produced by an optical maser (laser) / M. M. Zaret, G. M. Breinen, H. Schmidt, H. Ripps, I. M. Siegel, L. R. Solon // Science. – 1961. – № 134. – P. 1525 – 1526.

48. Vos J. J. A theory of retinal burns / J. J. Vos // Bull. Math. Biol. – 1962. – № 24. – P. 115 – 128.

49. Campbell C. J. The optical maser as a retinal coagulator: an evaluation / C. J. Campbell, M. C. Ritter, C. J. Koester // Trans. Amer. Acad. Ophth. Otol. – 1963. – № 67. – P. 58 – 67.

50. Ham W. T. Jr. Effects of laser radiation on the mammalian eye / W. T. Jr. Ham, R. C. Williams, H. A. Mueller, R. S. Ruffin, etc. // Trans. N.-Y. Acad. Sciences, ser. II. – 1966. – V. 28, № 5. – P. 517 – 526.
51. Sliney D. H. Evaluation of optical Hazards / D. H. Sliney, B. C. Freasier // Appl. Opt. – 1973. – V. 12, № 1. – P. 1 – 24.
52. Леонов Б. В. Лазеры и клетка / Б. В. Леонов, В. В. Шиходыров. – М.: Знание, 1966. – 32 с.
53. Файн С. Биологическое действие излучения лазера. Пер. с англ. / С. Файн, Э. Клейн. – М.: Атомиздат, 1968. – 103 с.
54. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. Пер. с англ. / Дж. Рэди. – М.: Мир, 1974. – 472 с.
55. Комарова А. А. Клинико-физиологическая характеристика состояния нервной системы у лиц, обслуживающих оптические квантовые генераторы / А. А. Комарова, Т. Ф. Маркова // Гигиена труда и профессиональные заболевания. – 1975. – № 8. – С. 8 – 12.
56. Комарова А. А. Воздействие на орган зрения отраженного лазерного излучения в производственных условиях / А. А. Комарова, В. П. Можеренков, Г. К. Скацкая и др. // Вестник офтальмологии. – 1978. – № 1. – С. 46 – 50.
57. Желтов Г. И. Термические эффекты при воздействии лазерного излучения на ткани глазного дна / Г. И. Желтов, Н. Г. Кондрашов, А. С. Рубанов, Л. А. Линник // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6, № 6. – С. 1296 – 1303.
58. Жохов В. П. Гигиена труда и профилактика профессиональной патологии при работе с лазерами / В. П. Жохов, А. А. Комарова, Л. И. Максимова, Ю. П. Пальцев и др. – М.: Медицина. 1981. – 208 с.
59. Суворов И. М. Влияние излучения лазеров на организм человека / И. М. Суворов, В. В. Добрынина, И. Н. Ушкова и др. // Врачебное дело. – 1981. – № 9. – С. 10 – 15.
60. Кармолин А. Л. Гигиеническое нормирование лазерного излучения / А. Л. Кармолин, Ю. П. Пальцев // Гигиенические аспекты использования лазерного излучения в народном хозяйстве. Сб. статей. – М.: МНИИ Гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана, 1982. – С. 92–96.
61. Глазков В. Н. Термохимическая модель расчета ПДУ облучения сетчатки в ближнем ИК диапазоне / В. Н. Глазков, Г. И. Желтов, Г. Г. Мешков и др. // Квантовая электроника. – 1983. – т. 10, № 7. – С. 1684 – 1685.

62. Желтов Г. И. Механизмы воздействия импульсного лазерного излучения на ткани глазного дна / Г. И. Желтов, В. Н. Глазков, А. И. Кирковский и др. – Минск: ИФАН БССР, 1989. – 39 с.

63. Пальцев Ю. П. Биологические эффекты и критерии оценки опасности лазерного излучения / Ю. П. Пальцев, Г. И. Желтов, А. А. Комарова // Вестник академии медицинских наук. – 1992. – С. 7 – 21.

64. Пальцев Ю. П. Эффекты воздействия лазерного излучения / Ю. П. Пальцев // Воздействие на организм человека опасных и вредных производственных факторов. Медико-биологические и метрологические аспекты. Справочник в 2-х томах. Кол. авт., т. 1. – М.: ИПК Изд-во стандартов 2004. – С.170 – 189.

65. Желтов Г. И. Проблемы безопасности при работе с лазерами / Г. И. Желтов // Вопросы лазерной офтальмологии. Сб. статей. ФГБУ Научно-исследовательский институт глазных болезней РАМН. – М: Изд-во «Астрель», 2013. – С. 15 – 31.

66. Alessi D., Laser safety / D. Alessi, K. Hartingen // NSF EUV ERC & Dept. of electrical And Computer Engineering, Colorado State University Fort Collins, CO.

67. Рахманов Б. Н. Безопасность при эксплуатации лазерных установок / Б. Н. Рахманов, Е. Д. Чистов – М.: Машиностроение, 1981. – 113 с.

68. Sliney D. Safety with Lasers and Other Optical Sources. A Comprehensive Handbook / D. Sliney, M. Wobbarsh. – New York and London.: Plenum Press, 1980. – 1035 p.

69. ANSI Z 136.1 – 1973. American National Standard for the Safe Use of Lasers.

70. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения. Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ.

71. Положение о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании (Утв. постановлением Правительства РФ от 24 июня 2000 г. №554).

72. ГОСТ 31581 – 2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

73. О стандартизации в Российской Федерации. Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ.

74. Рахманов Б. Н. Вопросы технического регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры. Часть I. Технические регламенты Таможенного союза / Б. Н. Рахманов, В. А. Девисилов, А. В. Митрофанов, В. Т. Кибовский // Фотоника. – 2013. – № 6/42. – С. 46 – 60.

75. Рахманов Б. Н. Вопросы технического регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры. Часть II. Предложения по разработке новой системы национальных

стандартов по лазерной безопасности / Б. Н. Рахманов, В. А. Девисилов, А. В. Митрофанов, В. Т. Кибовский // Фотоника. – 2014. – № 1/43. – С. 28 – 37.

76. Рахманов Б. Н. Тридцатилетний опыт разработки системы лазерной безопасности в России / Б. Н. Рахманов, В. А. Девисилов, А. В. Митрофанов, В. Т. Кибовский // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 1. – С. 33 – 39.

77. Рахманов Б. Н. Особенности отечественной лазерной безопасности или о том, почему и немцам, и американцам не так уж хорошо, а русским, белорусам и казахам вовсе не каюк / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Лазер-Информ. – 2014. – выпуск № 6 (525).

78. Рахманов Б. Н. Лазерная техника и безопасность. Вчера. Сегодня. Завтра. Часть 1 / Б. Н. Рахманов, Ю. П. Пальцев, В. Т. Кибовский, В. А. Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 4. – С. 67 – 81.

79. Рахманов Б. Н. Лазерная техника и безопасность. Вчера. Сегодня. Завтра. Часть 2 / Б. Н. Рахманов, Ю. П. Пальцев, В. Т. Кибовский, В. А. Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 5. – С. 47 – 57.

80. Рахманов Б. Н. Лазерная техника и безопасность. Вчера. Сегодня. Завтра. Часть 3 / Б. Н. Рахманов, Ю. П. Пальцев, В. Т. Кибовский, В. А. Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 6. – С. 75 – 85.

81. Рахманов Б. Лазер. Все же какого он класса опасности? Часть I / Б. Рахманов, В. Кибовский // Фотоника. – 2015. – № 5. – С. 42 – 49.

82. Рахманов Б. Н. Лазерная безопасность. Документы новые – проблемы старые / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Лазер-Информ. – 2016. – выпуск № 21-22 (588-589). – С. 1 – 13.

83. Рахманов Б. Н. Проблема противоречий в нормативной базе лазерной безопасности / Б. Н. Рахманов, Ю. П. Пальцев, В. Т. Кибовский // Гигиена и санитария. – 2017. – № 6. – С. 535 – 540.

84. Р 2.2.1766 – 03. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационные основы, принципы и критерии оценки.

85. Wyman P. W. Laser radar eye hazard consideration / P. W. Wyman // Appl. Optics. – 1968. – v. 8, № 2. – P. 383.

86. Кибовский В. Т. Оценка степени опасности направленных лазерных пучков для глаз человека / В. Т. Кибовский, В. И. Кухтевич, Л. А. Новицкий // Квантовая электроника. – 1980. – т. 7, №12. – С. 2523 – 2530.

87. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов / В. Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1966. – 564 с.

88. Gubisch R. W. Optical Performance of Human Eye / R. W. Gubisch // J. Opt. Soc. Amer. – 1967. – v. 52, № 3. – P. 407 – 415.
89. Кириллов А. И. Дозиметрия лазерного излучения / А. И. Кириллов, В. Ф. Морсков, Н. Д. Устинов – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
90. Желтов Г. И. Распределение интенсивности гауссовых пучков сфокусированных на сетчатку глаза / Г. И. Желтов, В. Н. Глазков // ДАН БССР. – 1989. – 33. – С. 414 – 417.
91. Рахманов Б. Н. Противодействие нарастанию лазерной угрозы безопасности жизнедеятельности методами лазерной дозиметрии на открытых пространствах / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 8. – С. 41– 47.
92. Рахманов Б. Н. Оценка степени опасности и ослепляющего действия лазерных изделий, работающих на открытых пространствах в видимой и ближней ИК областях спектра / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. – 2014. – № 1. – С. 1 – 24.
93. Рахманов Б. Н. О правовой ответственности за создание лазерных угроз / Б. Н. Рахманов В. Т. Кибовский // Мир транспорта. – 2014. – № 1. – С. 146 – 155.
94. Влияние оптического излучения на организм человека. Раздел I. Механизм воздействия оптического излучения на человека. Методическое пособие / С. И. Аневский, Ю. М. Золотаревский, В. С. Иванов, А. Ф. Котюк, О. А. Минаева, М. Н. Павлович, В. И. Саприцкий. – М.: Госстандарт России, 2002. – 46 с.
95. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
96. Ярош Р. Лазерная указка – игрушка или оружие [Электронный ресурс] / Р. Ярош. – Режим доступа: Сайт «РИА Новости». Библиотека изображений. Галерея, 04.07.2011.
97. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации (Утв. постановлением Правительства РФ от 11 марта 2010 г. № 138 (с изменениями и дополнениями от 5, 27 сентября 2011 г., 19 июля 2012 г.)).
98. Рахманов Б. Н. Определение размеров зон лазерной угрозы воздушным судам / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Мир транспорта. – 2015. – № 1. – С. 162 – 181.
99. Корндорф С. Ф. Расчет фотоэлектрических цепей / С. Ф. Корндорф, А. И. Дубиновская и др. – М.: Энергия, 1967. – 199 с.
100. Робинсон Ф. Н. Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. Пер. с англ. / Ф. Н. Х. Робинсон – М.: Атомиздат, 1980. – 256 с.

101. ГОСТ 12.2.032 – 78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
102. ГОСТ 12.2.033 – 78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
103. Кибовский В. Т. Универсальный измеритель энергетических характеристик излучения / В. Т. Кибовский, В. А. Косинец, М. Б. Мулукаева, Н. П. Сульженко, Б. В. Урысон // Оптико-физические измерения. Сборник научных работ молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во стандартов 1977. – С. 45 – 48.
104. Кибовский В. Т. Измерение энергии импульсов оптического излучения в широком диапазоне длительностей и частот повторения / В. Т. Кибовский, Ф. Х. Клычев, В. И. Кухтевич, Ш. А. Рубин // Измерительная техника. – 1981. – №3. – С. 32 – 34.
105. Кибовский В. Т. Универсальный лазерный дозиметр ИЛД-2 / В. Т. Кибовский, Ф. Х. Клычев, Ш. А. Рубин // Дозиметрия лазерного излучения. Сб. научных трудов. Под ред. Б. М. Степанова. – М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 1984. – С. 40 – 51.
106. Алексеев А.Г. Оценка степени опасности рассеянного лазерного излучения / А. Г. Алексеев, В. Т. Кибовский, С. А. Коновалов, Б. Н. Рахманов // Дозиметрия лазерного излучения. Сб. научных трудов. Под ред. Б. М. Степанова. – М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 1984. – С. 23 – 39.
107. Кузнецов П. А. Методы градуировки и поверки лазерных дозиметров с использованием рассеянного излучения / П. А. Кузнецов, В. М. Федоров, В. Т. Кибовский, Ф. Х. Клычев, Б. Н. Рахманов. – М.: Изд-во ФИАН им. П. Н. Лебедева, 1987. – 18 с.
108. Кибовский В. Т. Лазерное излучение / В. Т. Кибовский, Б. Н. Рахманов // Метрологическое обеспечение безопасности труда. Справочник в 2-х т. Колл. авт. Под ред. И. Х. Сологына. Т.1. Измеряемые параметры физических опасных и вредных производственных факторов. – М.: Изд-во стандартов 1988. – С. 144 – 171.
109. Рахманов Б. Н. Приборы дозиметрического контроля лазерного и ультрафиолетового излучения. Каталог / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский. – М.: Изд-во МИОТ, 1994. – 28 с.
110. Рахманов Б. Н. Метрологическое обеспечение лазерной безопасности / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Безопасность в техносфере. – 2013. – № 6. – С. 3 – 13.
111. Reisgen U. Innovation in ship building using vertical-down hybrid laser welding / U. Reisgen, S. Olschok, C. Turner // Industrial Laser Solutions for Manufacturing. – 2014. – July/August. – P. 6 – 8.

112. Автоматизация лазерной сварки, роботы для лазерной сварки [Электронный ресурс] – Режим доступа: [ds-robotics.ru /sections /robotyi-v-proizvodstve/svarka-lazernaya.html](http://ds-robotics.ru/sections/robotyi-v-proizvodstve/svarka-lazernaya.html).
113. Сварка и резка в Украине. Один + один – больше чем два [Электронный ресурс] – Режим доступа: nisa.net.ua/ship.php?article58.
114. Сборка автомобилей Volkswagen и Skoda на заводе в Калуге [Электронный ресурс] // – Режим доступа: [https://www.youtube.com /watch?v=61aXMh2Z1wV](https://www.youtube.com/watch?v=61aXMh2Z1wV).
115. Лазерная сварка корпуса автомобиля Audi [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=wLOuthozz7o>.
116. Московская государственная академия водного транспорта. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа за 2009 год [Электронный ресурс] – Режим доступа: msawt.com.
117. Створные знаки [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.kateralodki.ru /stvornyeznaki](http://www.kateralodki.ru/stvornyeznaki).
118. Савельев В. Г. Лазерный створный маяк «Анемон» [Электронный ресурс] / В. Г. Савельев // Речной транспорт (XXI век) – Режим доступа: [rivtrans.com/content/ lazernyi-stvornyi-mayak-anemon](http://rivtrans.com/content/lazernyi-stvornyi-mayak-anemon).
119. Хина А. А. Безопасность и надежность лазерного створного маяка для эксплуатации на подходах к морским портам: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.22.19/ Хина Андрей Анатольевич – М., 2012. – 23 с.
120. ГОСТ Р 56242 – 2014. Внутренний водный транспорт. Маяки створные лазерные в акваториях портов на подходах к ним и участках водных путей со стесненными условиями плавания. Общие требования.
121. Лазерный измеритель скорости и дальности с фотофиксацией ЛИСД-2Ф. Руководство по эксплуатации ЖГДК 433784 РЭ [Электронный ресурс] – Режим доступа: uchebilka.ru/sport/142097/index.html.
122. Зеленый лазер 200 mW [Электронный ресурс] – Режим доступа: vezetmne.ru/zelenyi-laser-200mW.
123. Прицелы лазерные для оружия [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ruspnevmo.ru/prices_laser.html.
124. Патрон для холодной пристрелки Yukon Sight Mark 7,62×39 Laser Bore Sights [Электронный ресурс] – Режим доступа: active-hunt.ru.
125. Лазерный дальномер (рулетка) Leica Disto A 5 [Электронный ресурс] – Режим доступа: tut.ru/rangefinders/1480/.

126. Лазерный дальномер (рулетка) Stabila LE 20 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.expertcen.ru/offer-3131.html.

127. Лазерная рулетка Agatec DM 100 [Электронный ресурс] – Режим доступа: laserdist.ru/index.php?product_id=142988route=product/product.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Применение лазерных технологий повышенного риска в транспортной отрасли. Аспекты безопасности и охраны труда

А.1 Лазерные технологические установки, применяемые в транспортном машиностроении

А.1.1 Судостроение

В современном судостроении широко применяются мощные лазерные технологические установки (ЛТУ) открытого типа, предназначенные для лазерной резки и сварки крупногабаритных металлических конструкций (рисунок А.1б).



а



б

Рисунок А.1 – Применение портальной ЛТУ открытого типа в судостроении: а – круизный лайнер в доке фирмы Meyer Werft (Германия); б – портальная ЛТУ для гибридной лазерной сварки крупногабаритных элементов морских и речных судов в доке Meyer Werft [111]

На рисунках А.2, А.3 показаны ЛТУ открытого типа, применяемые в ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (ОАО «ЦТСС», г. С. Петербург) [6]:

- порталный комплекс для лазерной резки, гибридной сварки стыков полотнищ и приварки ребер жесткости к полотнищам плоских секций (рисунок А.2);
- роботизированный комплекс лазерной резки и сварки (рисунок А.3).

В ЛТУ, показанных на рисунках А.2, А.3, используются волоконные лазеры, генерирующие лазерное излучение мощностью $P = 15$ кВт и $P = 25$ кВт, работающие на длине волны 1070 нм, лежащей в опасной для глаз ближней ИК области спектра. Мощность ЛИ, генерируемого этими излучателями, значительно превышает классификационный уровень (КУ) $P_{КУЗ} = 100$ Вт для ЛИЗ III класса опасности по СН 5804 [17] и $P_{КУЗВ} = 0,5$ Вт для ЛИЗ класса ЗВ по СанПин 2.2.4.3359 – 16 [18]. Следовательно, ЛТУ, показанные на

рисунках А.2, А.3, должны классифицироваться как ЛИЗ IV класса по СН или как ЛИЗ 4-го класса по СанПин.



Рисунок А.2 – Работа комплекса лазерной резки, гибридной лазерно-дуговой сварки и приварки ребер жесткости к полотнищам плоских секций размерами 12×12 м

работе не происходило облучение персонала лазерным излучением. Конструкция лазерных изделий III, IV классов (3В, 4-го классов по СанПин, авт.) должна обеспечивать возможность дистанционного управления».

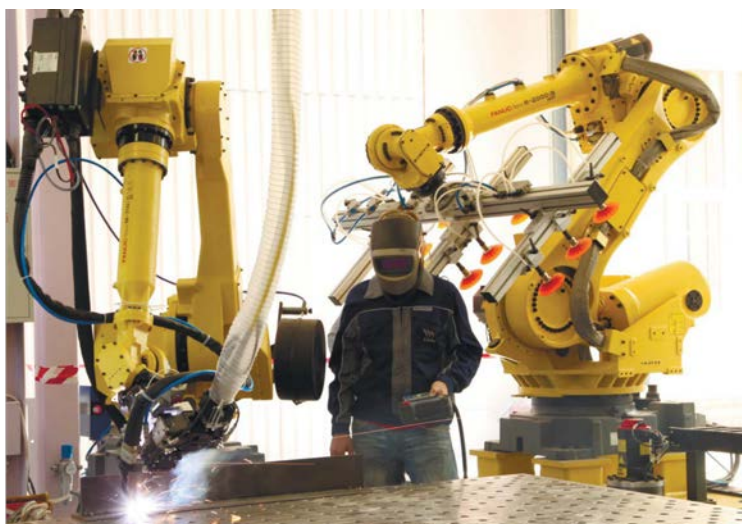


Рисунок А.3 – Роботизированный комплекс для лазерной резки и сварки металлоконструкций для морских и речных судов

Приведем отдельные требования к эксплуатации ЛИЗ IV класса из СН [17] и ЛИЗ класса 4 из СанПин [18] (номера пунктов СанПин приведены в скобках рядом с номерами пунктов из СН).

«6.11 (8.4.1.11). Пульт управления лазерными изделиями, независимо от класса, должен размещаться так, чтобы при регулировке и

«7.5 (8.4.2.4) В пределах рабочей зоны уровни воздействия лазерного излучения ... не должны превышать значений, установленных настоящими Правилами ... (т.е. уровни ЛИ в точках рабочей зоны не должны превышать ПДУ лазерного излучения, регламентированных в СН 5804 [17] и СанПин [18], авт.)».

«7.10. При использовании лазерных изделий III и IV класса область взаимодействия лазерного пучка и мишени должна ограждаться материалами, непрозрачными для лазерного излучения ...».

Как видим, требование 7.10 для ЛТУ, показанной на рисунке А.2, не выполнено, а для ЛТУ, показанной на рисунке А.3, не выполнены требования 6.11, 7.10.

Можно утверждать, что из-за крайне высокой мощности ЛИ, применяемого в показанных выше ЛТУ открытого типа, весьма вероятны условия труда, при которых лазерное излучение, отраженное от поверхности воздействия имеет крайне высокий уровень плотности мощности (облученности), превышающий ПДУ в местах возможного нахождения глаз операторов в десятки или сотни раз, т.е. требования п. 7.5 (8.4.2.4) не выполняются. Значения КСОЛ $R_{\text{сол од max}}$ могут превышать 100, а в наиболее неблагоприятных условиях падения лазерного пучка на мишень, могут превысить 10^3 . Таким образом, в соответствии с таблицей 2.1, предназначенной для специальной оценки условий труда (СОУТ), **на рабочих местах операторов вероятны вредные условия труда подкласса 3.4 или опасные условия труда класса 4. Для точных оценок КСОЛ при СОУТ необходимо проведение инструментального контроля безопасности лазерного излучения на рабочих местах с помощью лазерных дозиметров при всех технологических операциях, предусмотренных для рассматриваемых ЛТУ открытого типа.**

А.1.2 Автомобилестроение

В настоящее время в отечественном и зарубежном автомобилестроении применяется роботизированная лазерная сварка. Переход на автоматическую сварку с использованием роботов минимизирует время цикла в несколько раз по сравнению с традиционными

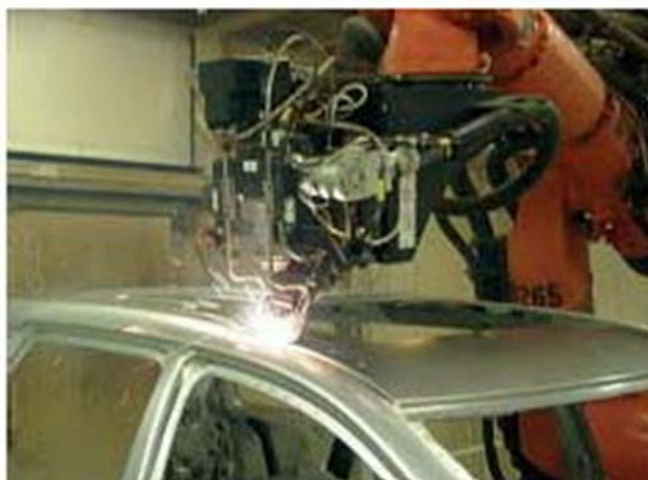


Рисунок А.4 – Лазерно-дуговая сварка крыши автомобиля Vc/vo XC 90 с одновременным сдавливанием листа роликом перед лазерным пучком [113]

технологиями.

Это достигается, в том числе, организацией поточного производства с обеспечением одновременной сборки и сварки изделий [112, 113]. Пример применения роботизированной лазерной сварки приведен на рисунке А.4. В публикациях [112, 113] не приводятся данные о выходной мощности ЛТУ,

однако можно предположить, что в роботизированных ЛТУ для лазерной сварки (рисунок А.4) используются

лазерные излучатели с мощностью $P = 3 - 5$ кВт. Значение мощности ЛИ, генерируемого

лазерами этих ЛТУ, позволяет отнести рассматриваемые ЛТУ к ЛИЗ IV класса по СН и ЛИЗ 4-го класса по СанПин.

В интернете размещены видеофильмы, демонстрирующие процессы производства легковых автомобилей различных марок. Так, например, в видеофильме [114] показан процесс сборки автомобилей марок Volkswagen и Skoda на автозаводе фирмы «Volkswagen Group Rus» в г. Калуга, а в видеоролике [115] – процесс сборки корпуса автомобиля Audi на автозаводе концерна «Audi» в Германии. В видеофильмах подробно показана работа поточных роботизированных линий сварки металлических каркасов автомобилей и лазерной сварки кузовов с помощью роботизированных ЛТУ аналогичных показанной на рисунке А.4. В видеоролике [114] показано, как происходит гибридная лазерная сварка крыши кузова с его каркасом. Процесс происходит в закрытой камере, исключая несанкционированное нахождение людей вблизи зоны лазерной сварки. Процесс сварки отображается на экране видеомонитора, размещенного на пульте управления, расположенном за пределами камеры лазерной сварки.

Таким образом, при штатных условиях эксплуатации ЛТУ, применяемые в автомобилестроении, являются установками закрытого типа, для которых заведомо выполняются требования п. 6.11 (8.4.1.11), 7.5 (8.4.2.4) СН (СанПин) и п. 7.10 СН, и можно считать, что для рабочего места оператора выполняется условие $R_{\text{СОЛ ХР max}} < 1$. **Условия труда классифицируются как допустимые класса 2** (см. таблицу 2.1).

А.1.3 Локомотивостроение и вагоностроение

На Московском Тормозном Заводе ОАО «МТЗ Трансмаш» существует «Центр лазерных технологий» [8]. Некоторые лазерные технологические установки «Центра» показаны на рисунках А.5, А.6. В ЛТУ, показанных на рисунке А.5, А.6, используются мощные волоконные лазеры с мощностью $P = 5 - 15$ кВт, т. е. ЛТУ относятся к ЛИЗ IV класса опасности по СН и к ЛИЗ 4-го класса по СанПин.

ЛТУ для гибридной лазерной сварки (рисунок А.5а) является установкой закрытого типа. В ЛТУ для лазерной резки (рисунок А.5б) зона обработки материала закрыта защитными щитками и следует предположить, что отраженное ЛИ не попадает на оператора в процессе эксплуатации. Таким образом, для РМ оператора выполняется условие $R_{\text{СОЛ ХР max}} < 1$. **Условия труда на ЛТУ (рисунки А.5а, А.5б) можно классифицировать как допустимые класса 2.**



а



б

Рисунок А.5 – Лазерные технологические установки ОАО «МТЗ Трансмаш»: а – ЛТУ для гибридной лазерно-дуговой сварки материалов б – ЛТУ для лазерной резки

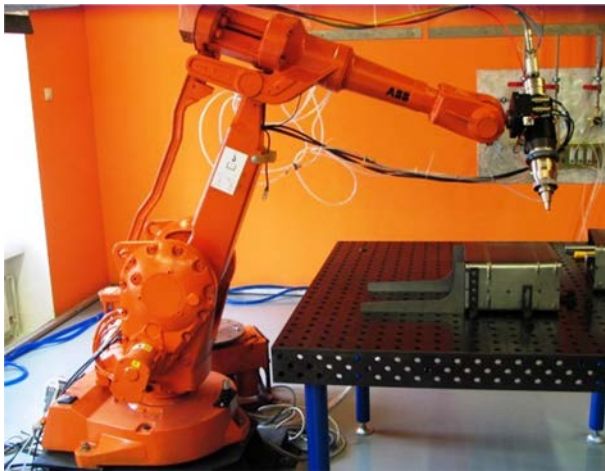


Рисунок А.6 –Роботизированный лазерный комплекс по обработке материалов

Как и в случае применения роботизированной ЛТУ для лазерной сварки, показанной на рисунке А.3, можно утверждать, что из-за крайне высокой мощности ЛИ, применяемого в ЛТУ открытого типа, показанной на рисунке А.6, весьма вероятны условия труда, при которых значения КСОЛ $R_{\text{СОЛ}} \text{ од max}$ на РМ могут превышать 100 и 10^3 . Таким образом, *на рабочем месте оператора могут создаваться вредные условия труда*

подкласса 3.4 или опасные условия труда класса 4 (см. таблицу 2.1).

Для точных оценок КСОЛ при СОУТ необходимо проведение инструментального контроля безопасности лазерного излучения на рабочих местах с помощью лазерных дозиметров при всех технологических операциях, предусмотренных для данной ЛТУ.

А.2 Навигационная лазерная система «Анемон-3»

В Московской государственной академии водного транспорта (МГАВТ) с 80-х годов прошлого века проводятся работы по лазерной навигации для обеспечения безопасности судов при подходах к морским портам и на внутренних водных путях [116]. Созданный лазерный створный маяк (ЛСМ) «Анемон» (рисунок А.7) предназначен для обозначения направления и границ судового хода. Разработчиками была предложена принципиально

новая схема лазерного створа с использованием сканирующих лазерных пучков. ЛСМ «Анемон» состоит из двух установленных на берегу «модулей лазерных сканирующих» (лазерных маяков ЛМ), пучки которых синхронно двигаются в горизонтальной плоскости, пересекаясь (рисунок А.8 [117]).



Рисунок А.7 – Вышка лазерного створного маяка «Анемон» [116]

«Зрительная задача, решаемая судоводителем, состоит в том, чтобы вести судно в зоне одновременного восприятия огней, расположенных вдоль берега» [12]. При движении по фарватеру судоводитель видит оба лазерных огня в виде одновременных проблесков. Вследствие малой угловой расходимости каждый из лазерных пучков попадает в поле его зрения лишь на короткое время. Поэтому они воспринимаются как проблесковые вспышки. При отклонении от фарватера синхронность вспышек нарушается, и в зависимости от отклонения вправо или влево первым появляется соответственно правый или левый огонь. Вместе они воспринимаются как «бегущий огонь», подобный бегущей строке. Этот «бегущий огонь» всегда указывает в сторону фарватера [12].

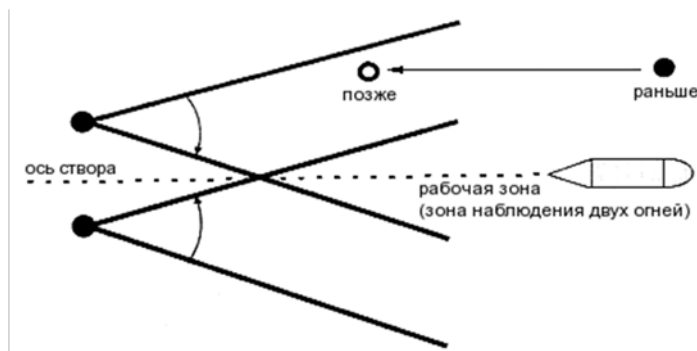


Рисунок А.8 – Принцип действия лазерного створного маяка «Анемон» [117]

«Простота и надежность в эксплуатации, высокая заметность лазерного огня среди других огней, незначительное энергопотребление, **безопасность для глаз судоводителей подтвержденная медицинским заключением**, высокая точность обозначения створной линии делают ЛСМ значительно превосходящим по эксплуатационным возможностям все существующие створы» [116].

За последние годы лазерный створный маяк был значительно усовершенствован. «Анемон-2» действовал не на основе довольно громоздких газовых лазеров а на базе

полупроводниковых лазеров. На порядок уменьшились энергопотребление и масса установки. Затем появился усовершенствованный «Анемон-3» [118] (рисунок А.9).



Рисунок А.9 – лазерные модули ЛСМ «Анемон-3» на верхней площадке переднего створного знака в порту г. Туапсе [12]

Для определения класса опасности ЛСМ «Анемон-3» необходимо знать длину волны и мощность лазерного излучения на выходе каждого из двух лазерных маяков входящих в состав ЛСМ. Воспользуемся авторефератом

диссертации «Безопасность и надежность лазерного створного маяка для эксплуатации на подходах

к морским портам» [119]. В [119] указано, что в ЛМ применяется лазерный излучатель, представляющий собой блок лазерных полупроводниковых диодов марки Sanyo DL-3147-060 с длиной волны $\lambda = 650$ нм. **Мощность ЛИ на выходе ЛМ $P = 25$ мВт.**

Значение $P_{\text{ПДУ}}$, требуемое для определения значения КУ, вычисляем по формуле $P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}}/t_{\text{в}}$, где $t_{\text{в}} = 0,25$ с – время мигательного рефлекса, $W_{\text{ПДУ}}$ – определяем по формуле таблицы 3.3 СН для спектрального интервала (СПИ) $600 < \lambda \leq 750$ нм при $t = t_{\text{в}} = 0,25$ с. Получаем **$P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт.**

Таким образом, **выполняется условие $P_{\text{ПДУ}} \ll P < P_{\text{КУ}2}$, где $P_{\text{КУ}2} = 1,6 \cdot 10^{-1}$ Вт = 160 мВт** – значение верхнего КУ для ЛИЗ класса II в СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм по СН 5804 [17] (см. таблицу 1.4). Кроме того выполняется условие **$P_{\text{КУ}3\text{R}} < P < P_{\text{КУ}3\text{B}}$, где $P_{\text{КУ}3\text{R}} = 5$ мВт** – значение КУ для ЛИЗ класса 3R по СанПин [18], **$P_{\text{КУ}3\text{B}} = 500$ мВт** – значение КУ для ЛИЗ класса 3B по СанПин.

Полученный результат означает, что **каждый ЛМ лазерного створного маяка «Анемон-3» и сам ЛСМ «Анемон-3» представляют собой ЛИЗ класса II по СН и ЛИЗ класса 3B по СанПин.**

Из [119] следует, что разработчики ЛСМ присвоили этому изделию класс опасности 3А по ГОСТ Р 50723 – 94, в котором был предусмотрен класс 3А. В настоящее время в СанПин [18] вместо класса 3А регламентирован класс 3R, а ЛИЗ с мощностью выходного излучения $P = 25$ мВт **представляет собой ЛИЗ класса 3B.** Класс 3А (3R), присвоенный ЛСМ в работе [119], определен ошибочно. Это объясняется тем, что автор [119] использовал для классификации ЛСМ не значение мощности ЛИ на выходе ЛМ, а значение энергетической экспозиции в некоторой точке, значительно удаленной от выходного окна

ЛМ (на расстояние порядка 80 м), что является ошибкой. Автор [119] спутал задачу оценки степени опасности ЛИ лазерного пучка с задачей классификации ЛИЗ по степени опасности выходного излучения.

ЛСМ «Анемон-3» и входящие в его состав ЛМ являются одними из немногих видов ЛИЗ для работы на ОПР, которые *специально рассчитаны на облучение глаз человека (в данном случае – судоводителя) лазерным пучком* (в отличие, например, от рассмотренных выше в разделе А.1 случаев облучения человека диффузно отраженным ЛИ, являющихся не преднамеренными, а случайными). Это означает, что СОУТ при эксплуатации ЛСМ должна проводиться с позиций выполнения требований отечественных санитарно-гигиенических нормативных документов более жестких по значениям гигиенических нормативов (ПДУ), чем требования МЭК (см. п. 1.2.3).

Примем, что угол расходимости лазерного пучка имеет наименьшее из значений, регламентированных в п. 7.6 ГОСТ Р 56242 [120], т.е. $\Theta_{0,5} = 3$ угл. мин. $= 9 \cdot 10^{-4}$ рад по уровню 0,5. В работе [117] показан вид распределения энергетической экспозиции в дальней зоне лазерного пучка, генерируемого ЛМ. График этого распределения довольно близко совпадает с кривой Гаусса, что позволяет считать лазерный пучок ЛМ гауссовым пучком TEM₀₀ моды. Угол расходимости Θ по уровню e^{-2} определяем по формуле $\Theta = 1,7 \Theta_{0,5} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ рад.

Примем, что диаметр лазерного пучка на выходе из ЛМ $d_{\text{ли}} = 3$ мм. По формулам (2.47), (2.52) получаем $Z_{\text{БЗ}} = 2,7$ м; $Z_{\text{СЗ}} = 10$ м.

Вычислим $Z_{\text{ЛЮЗ}}$ для лазерного пучка ЛМ при отключенном механизме сканирования. Это означает, что время воздействия ЛИ на глаза человека следует принять равным $t_{\text{в}} = 0,25$ с. По формуле (2.58) для $P = 25$ мВт, $\Theta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ рад, $P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт получаем $Z_{\text{ЛЮЗ}} = 72$ м.

В процессе пуско-наладочных и ремонтных работ (ПНРР) на ЛСМ возможна ситуация, когда в плоскость зрачка глаза предполагаемого наблюдателя (например, наладчика) попадают одновременно пучки ЛИ, генерируемые двумя ЛМ, входящими в состав ЛСМ, причем режим сканирования на обоих ЛМ отключен. *Этот случай является наихудшим с точки зрения угрозы зрительному аппарату человека.* Для рассматриваемого случая принимаем $P = 50$ мВт и получаем $Z_{\text{ЛЮЗ}} = 103$ м. Заметим, что *подобная ситуация может возникнуть и для глаз судоводителя в процессе штатной эксплуатации ЛСМ в силу каких-нибудь форс-мажорных обстоятельств, приводящих к выводу из строя систем сканирования при неотключенных лазерных излучателях.*

Определим КСОЛ на расстоянии $Z = 50$ м от выходного окна ЛМ по формулам (2.48), (2.49). Принимая $P = 25$ мВт, $\Theta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ рад, $P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт получаем $R_{\text{СОЛод max}} = 2$.

В пределах ЛОЗ наибольшее значение коэффициента степени опасности ЛИ равно максимальному значению КСОЛ для ближней зоны одного лазерного пучка ($Z < Z_{\text{БЗ}}$), вычисляемому по формуле $R_{\text{СОЛОДmax}} = P/P_{\text{ПДУ}}$ (см. п. 2.5.2). Принимая $P = 25$ мВт, $P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт, получаем $R_{\text{СОЛОДmax}} = 125$.

Используя полученные выше результаты и применяя таблицу 2.1 для предварительной (расчетной) специальной оценки условий труда (ПСОУТ), приходим к следующим выводам.

Условия труда судоводителей, находящихся на расстоянии более $Z_{\text{ЛОЗ}}$ от ЛСМ, можно классифицировать как допустимые класса 2.

Условия труда судоводителей, находящихся на расстоянии около 50 м от ЛСМ, можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.2.

Условия труда персонала и настройщиков при проведении ПНРР, находящихся на расстоянии порядка 3 м, от ЛМ, можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.4.

А.3 Лазерная курсо-глиссадная система посадки воздушных судов

Более 30-ти лет назад в Самарском (Куйбышевском) конструкторском бюро автоматических систем (КБАС) была разработана первая отечественная система лазерной навигации «Глиссада» для обеспечения безопасности при посадке воздушных судов. Принцип действия лазерной курсо-глиссадной системы (ЛКГС) «Глиссада» поясняет рисунок А.10. На поверхности земли вблизи края взлетно-посадочной полосы (ВПП) располагаются три лазерных излучателя (лазерные маяки, ЛМ), генерирующие хорошо видимые глазом лазерные пучки красного цвета ($\lambda = 635$ нм). Два параллельных боковых лазерных пучка показывают боковые границы посадочного коридора (створа), нижний лазерный пучок показывает направление глиссады.

За прошедшие годы ЛКГС «Глиссада» неоднократно модернизировалась. В 2000-х годах в ЗАО «Кантегир» и ЗАО «Глиссада» (г. Самара) была разработана ЛКГС «Глиссада-М» [13], основанная на применении лазерных излучателей ЛИ-635-150/300 (рисунок А.11б), которые содержат блоки лазерных модулей на основе лазерных полупроводниковых диодов (ЛПД).

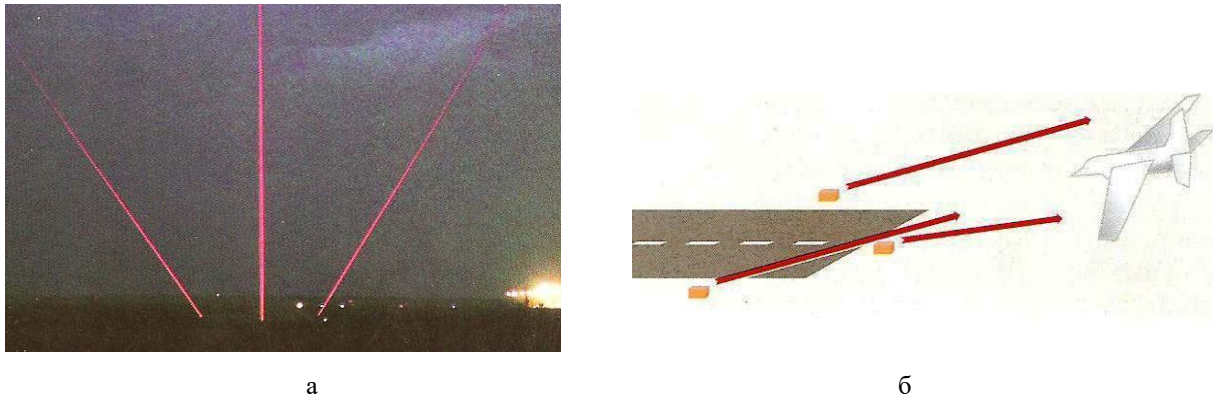


Рисунок А.10 – Лазерная курсо-глиссадная система «Глиссада»: а – лазерные пучки ЛКГС «Глиссада», указывающие посадочный створ (вид с земли), б – принцип действия ЛКГС «Глиссада» [13]

Лазерные излучатели вмонтированы в корпус ЛМ, устройство которого обеспечивает регулировку лазерного пучка по курсу и по глиссаде (рисунок А.11 а).

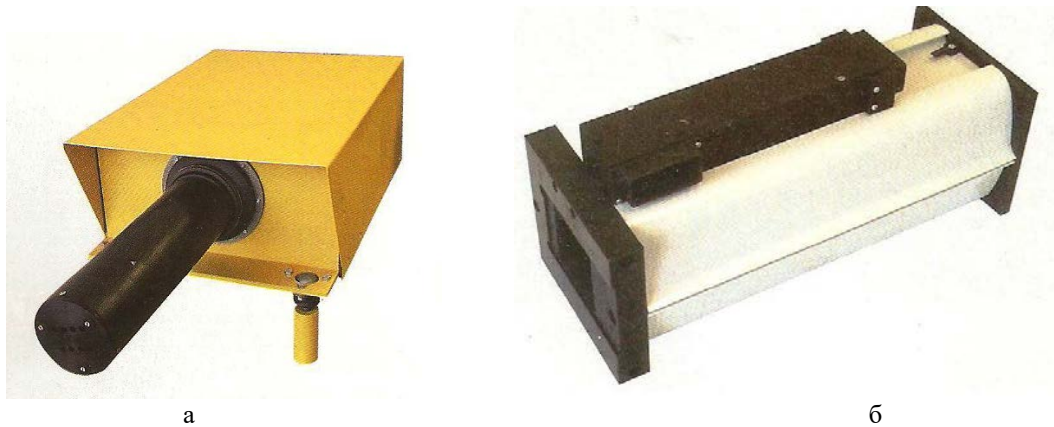


Рисунок А.11 – Лазерный маяк ЛКГС «Глиссада-М»: а – общий вид лазерного маяка, б – лазерный излучатель ЛИ-635-150/300

В круглой крышке, расположенной в плоскости выходного зрачка лазерного маяка (рисунок А. 11а), имеются 8 выходных отверстий. Эти отверстия представляют собой выходные апертуры для 8-ми лазерных пучков генерируемых одновременно лазерными модулями, расположенными внутри лазерного излучателя (рисунок А.11б). Таким образом, в дальней зоне действия ЛМ, пучок ЛИ представляет собой суперпозицию из 8-ми расходящихся и перекрывающих друг друга лазерных пучков. В работе [13] приведены следующие пространственные параметры лазерного пучка, генерируемого лазерным маяком:

«сечение луча на выходе, мм 45×30 (для ЛИ-635-150),
 45×45 (для ЛИ-635- 300);
 расходимость излучения, мрад < 0,8».

Описывая устройство лазерного излучателя, авторы [13] пишут: «Источником излучения служит блок лазерных модулей, представляющий собой матрицу из отдельных лазерных модулей с высококоллимированным излучением. ... Матричная конструкция

имеет размер излучающей площадки в несколько квадратных сантиметров а это позволяет получать довольно «толстый» луч, визуально обнаруживаемый при рассеянии в атмосфере с больших расстояний (до 15 км). Специально разработанная технология юстировки блока обеспечивает малую расходимость суммарного пучка излучения при небольших габаритах всего устройства по сравнению с вариантом создания источника на одном мощном многомодовом лазерном диоде».

«Если принять угол расходимости излучения от отдельного модуля не более 0,3 мрад, то диаметр сечения луча на расстоянии, например, 1 км, будет равен 0,3 м. А считая приближенно, что лучи в пучке распространяются практически параллельно и, учтя размер их суммарного сечения на выходе излучателя 45×45 мм, получаем, что сечения лучей на таких больших расстояниях практически накладываются друг на друга ... Полная расходимость измерялась методом двух сечений» [13]. К сожалению, авторы работы [13] не указывают уровень, по которому определен угол расходимости, что является нарушением требования 6.4 СН 5804 – 91 [17].

Класс опасности ЛКГС «Глиссада-М» в [13] не указан, однако это сделать довольно просто, если знать длину волны и мощность P излучения на выходе каждого из лазерных маяков ЛМ, входящих в состав ЛКГС. В работе [13] указано, что ЛКГС генерирует ЛИ с $\lambda = 635$ нм. Кроме того в [13] указано, что в ЛКГС может применяться либо лазерный маяк, имеющий $P = 150$ мВт (с лазерным излучателем модели ЛИ-635-150), либо ЛМ, имеющий $P = 300$ мВт (с излучателем ЛИ-635-300). Таким образом, **для ЛМ на базе ЛИ-635-150 выполняется условие $P_{\text{ПДУ}} \ll P < P_{\text{КЛ2}}$, где $P_{\text{КЛ2}} = 1,6 \cdot 10^1 \text{ Вт} = 180 \text{ мВт}$** – значение верхнего КУ для ЛИЗ класса опасности II в СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм по СН 5804 [17]. Кроме того выполняется условие **$P_{\text{КЛ3R}} < P < P_{\text{КЛ3B}}$, где $P_{\text{КЛ3R}} = 5 \text{ мВт}$** – значение КУ для ЛИЗ класса 3R по СанПин [18], **$P_{\text{КЛ3B}} = 500 \text{ мВт}$** – значение КУ для ЛИЗ класса 3B по СанПин. Таким образом, **лазерный маяк с излучателем ЛИ-635-150 представляет собой ЛИЗ II класса по СН и ЛИЗ класса 3B по СанПин.** Для ЛМ на базе ЛИ-635-300 выполняется условие **$P > P_{\text{КЛ2}}$** , т.е. **лазерный маяк с излучателем ЛИ-635-300 представляет собой ЛИЗ III класса опасности по СН и ЛИЗ класса 3B по СанПин.**

Определим расстояние до границы ЛОЗ $Z_{\text{ЛОЗ}}$ (м). Примем, что угол расходимости лазерного пучка ЛМ $\Theta = 8 \cdot 10^{-4}$ рад измерен по уровню e^{-2} . Считаем, что распределение энергетической экспозиции в дальней зоне лазерного пучка совпадает с кривой Гаусса, т.е. считаем лазерный пучок ЛМ гауссовым пучком ТЕМ₀₀ моды. Примем, что эквивалентный диаметр лазерного пучка на выходе из ЛМ $d_{\text{ЛИ}} = [1,27(45 \times 45)]^{1/2} = 51$ мм. Для ЛМ с лазерным излучателем ЛИ-635-150 ($P = 150$ мВт) по формуле (2.48) при $\Theta = 8 \cdot 10^{-4}$ рад, $P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт получаем **$Z_{\text{ЛОЗ}} = 275 \text{ м}$** ; для ЛМ с излучателем ЛИ-635-300 ($P = 300$ мВт) получаем

$Z_{\text{ЛОЗ}} = 416$ м. Полученный результат $Z_{\text{ЛОЗ}}$ для ЛИ-635-150 хорошо согласуется со значением $Z_{\text{ЛОЗ}} = 250$ м, полученным в [13] экспериментальным путем.

Считаем, что для пилота ВС, находящегося в пределах ЛОЗ, могут возникнуть форс-мажорные обстоятельства, приводящие к необходимости резкого ухода с направления глиссады, в результате чего лазерный пучок может попасть в глаз пилота. *Этот случай является наихудшим с точки зрения нанесения травмы глазу.* Примем, что в момент пересечения пучка зрачок оказывается на расстоянии $Z = 100$ м от выходного окна ЛМ. Вычислим КСОЛ для $Z = 100$ м по формулам (2.48) для гауссова пучка с параметром $k_{\text{ЗРГ}} = 98 (d_{\text{ли}} + 10^3 Z \Theta)^2$ (см. формулу (2.54)) При $\Theta = 8 \cdot 10^{-4}$ рад, $Z = 100$ м, $P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт для ЛМ с лазерным излучателем ЛИ-635-150 получаем $R_{\text{СОЛ од max}} = 4,3$; для ЛМ с излучателем ЛИ-635-300 получаем $R_{\text{СОЛ од max}} = 8,6$.

Для персонала (наладчиков) ЛКГС «Глиссада-М» наихудшие условия с позиций ЛБ возникают при проведении ПНРР вблизи выходного окна лазерного маяка, причем следует считать, что в зрачок глаза наладчика может целиком попасть лазерный пучок, выходящий из одного из 8-ми выходных отверстий ЛМ (рисунок А.11а).

Примем, что диаметр одного лазерного пучка на выходе из ЛМ $d_{\text{ли}} = 3$ мм. По формулам (2.47), (2.52) для $\Theta = 3 \cdot 10^{-4}$ рад получаем $Z_{\text{БЗ}} = 13$ м; $Z_{\text{СЗ}} = 65$ м.

Наибольшее значение КСОЛ равно его максимальному значению в ближней зоне одного лазерного пучка, вычисляемому по формуле $R_{\text{СОЛ од max}} = P_1/P_{\text{ПДУ}}$, где $P_1 = P/8$ мощность ЛИ отдельного лазерного модуля. Принимая $P_{\text{ПДУ}} = 0,2$ мВт, для ЛМ с излучателем ЛИ-635-150 получаем $R_{\text{СОЛ од max}} = 94$; для ЛМ с ЛИ-635-300 получаем $R_{\text{СОЛ од max}} = 188$.

На основании полученных результатов ПСОУТ можно сделать следующие выводы:

Условия труда пилотов ВС, находящихся на расстоянии более $Z_{\text{ЛОЗ}}$ от ЛМ, можно классифицировать как допустимые класса 2.

Условия труда пилотов находящихся на расстоянии равном или менее $Z_{\text{ЛОЗ}}$, с учетом форс-мажорных обстоятельств можно классифицировать как вредные подкласса 3.2.

Условия труда персонала ЛКГС «Глиссада-М» при проведении ПНРР можно классифицировать как вредные условия подкласса 3.3 для ЛМ с излучателем ЛИ-635-150 и подкласса 3.4 для ЛМ с излучателем ЛИ-635-300.

А.4 Лазерные измерители скорости и дальности для контроля безопасности дорожного движения

На выставках «Фотоника. Мир лазеров и оптики» на протяжении ряда лет демонстрируются лазерные измерители скорости и дальности, предназначенные для служб контроля безопасности дорожного движения (ГИБДД). Эти ЛИЗ представляют собой разновидность ИК лазерных дальномеров которую можно назвать «ИК лазерные дальномеры-скоростемеры» (ЛДС-ИК). По сравнению с хорошо известными водителям автотранспорта радарами-скоростемерами, работающими в СВЧ диапазоне, ЛДС-ИК имеют преимущества по точности фиксации конкретного автомобиля в потоке движущегося автотранспорта. Эта точность достигается за счет крайне высокой степени локализации ЛИ в пространстве, обеспечиваемой малым углом расходимости лазерного пучка. Естественно, дальность действия ЛДС-ИК и точность измерения скорости и дальности движущегося объекта зависят прежде всего от значения энергетических параметров импульсно-модулированного ЛИ, генерируемого ЛДС-ИК, т.е. чем больше энергия импульса ЛИ $W_{\text{и}}$ и средняя мощность P серии импульсов тем больше дальность и выше точность измерений причем одновременно становится выше и риск неблагоприятного воздействия ЛИ на глаза водителя автотранспорта.

Таким образом, естественное стремление разработчиков повысить дальность и точность разрабатываемых ЛИЗ наталкивается на ограничения, накладываемые требованиями лазерной безопасности. При этом следует учитывать, что применение подобных ЛИЗ является по существу еще одним после рассмотренного выше ЛСМ «Анемон-3» вариантом применения ЛИЗ на ОНР, когда *вполне сознательно проводится облучение лица человека (в данном случае – водителя) лазерным пучком*. Ведь практически крайне трудно облучать лишь корпус автомобиля, идущего навстречу инспектору, и не попадать лазерным пучком в лобовое стекло.

На рисунке А.12 показан ЛДС-ИК марки «ЛИСД-2Ф», разработанный НИИ «Полюс», и выпускаемый оптико-механическим заводом «Зенит». «ЛИСД-2Ф» снабжен дополнительной функцией фоторегистрации автомобилей, нарушающих скоростной режим. Для наведения на объект измерения «ЛИСД-2Ф» снабжен монокулярной оптической системой (ОС), расположенной сверху. Кроме того имеются еще две ОС. Первая предназначена для формирования и испускания лазерного пучка а также для приема ЛИ отраженного от объекта, вторая – для формирования изображения контролируемого автомобиля на экране-дисплее, расположенном со стороны инспектора-оператора.

Приведем отдельные технические характеристики «ЛИСД-2Ф», приведенные в «Руководстве по эксплуатации» для «ЛИСД-2Ф» [121] (далее РЭ).

1.2.2 Диапазон измеряемых скоростей – от 0 до 250 км/ч.

1.2.3 Диапазон измерения дальности до ТС (*транспортного средства, авт.*) – от 40 до 300 м ...

1.2.6 Ширина диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости – не более 3 мрад ... (*это означает, что угол расходимости пучка лазерного излучения равен 3 мрад, при этом уровень, по которому определен этот угол, не указан, авт.*)

1.2.15 Продолжительность одного цикла измерения скорости в режиме «Р» не более 0,5 с, в режиме «А» – не более 0,7 с («Р» – *режим измерения с ручным управлением оператором-инспектором, «А» – режим измерения в автоматическом режиме, авт.*)».



Рисунок А.12 – Лазерный измеритель скорости и дальности «ЛИСД-2Ф»

В основе работы измерителя «ЛИСД-2Ф» лежит импульсный метод измерения расстояний с преобразованием временного интервала. В качестве излучателя применяется ЛПД. Излучатель вырабатывает зондирующий лазерный импульс длительностью 40 нс и через формирующую оптику посылает его в направлении контролируемого объекта. Одновременно формируется опорный стартовый электрический импульс.

Попадая на цель, импульс ЛИ отражается в виде импульса диффузно отраженного лазерного излучения в сторону «ЛИСД-2Ф», принимается его приемной ОС, фокусируется на фоточувствительной площадке лавинного фотодиода и преобразуется в электрический сигнал «Стоп». Измерение дальности до цели сводится к измерению интервала между стартовым и стоповым импульсами. В течение одного цикла измерений дальность до объекта определяется два раза. Вначале происходит суммирование первых результатов 400 измерений дальности с их последующим усреднением. Следующие 400 измерений позволяют определить второе значение дальности. Скорость определяется путем вычисления приращения расстояния до объекта между двумя усредненными результатами за заданный временной интервал [14].

Таким образом, ЛИ, генерируемое «ЛИСД-2Ф», представляет собой последовательность серий из 400 коротких импульсов с высокой частотой повторения. Частота повторения серий составляет сотни или десятки герц.

«ЛИСД-2Ф» предназначен в основном для индивидуального применения инспектором ГИБДД «с руки». В настоящее время в НИИ «Полюс» разработан ЛДС-ИК марки «ЛУЧ-М» (рисунок А.13), предназначенный для работы в стационарном положении с закреплением излучающего и приемного узла на штативе (рисунок А.13а). При этом «ЛУЧ-М» может работать в автономном режиме и передавать информацию по WiFi на расстояние до 1 км на удаленный пост ГИБДД.

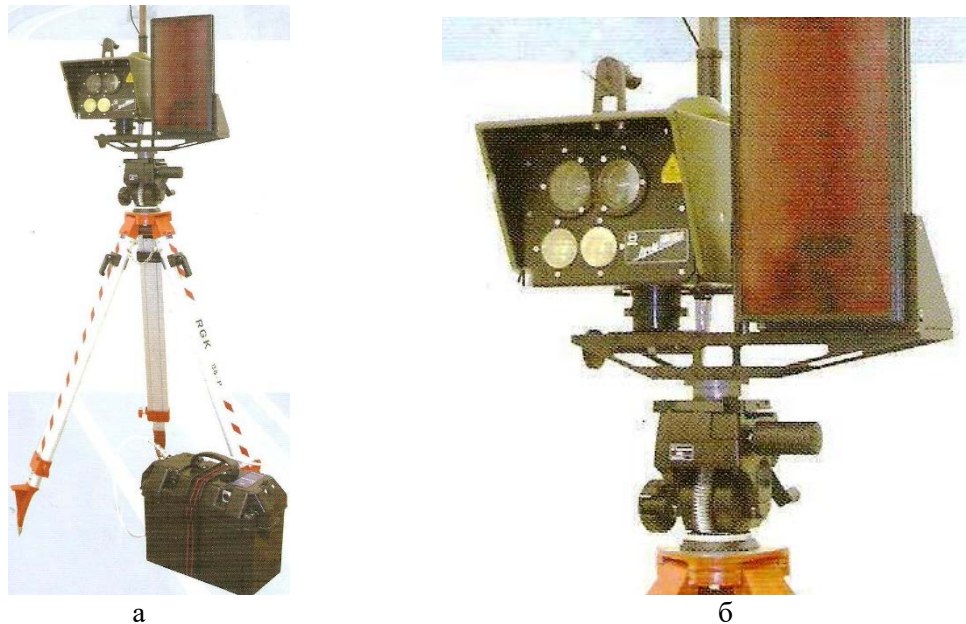


Рисунок А.13 – Лазерный измеритель скорости «ЛУЧ-М»: а – «ЛУЧ-М» в рабочем положении, б – излучающий и регистрирующий блок измерителя «ЛУЧ-М»

Приведем отдельные технические характеристики «ЛУЧ-М», приведенные в рекламном проспекте.

«Диапазон измерения скорости	0 – 250 км/ч
Диапазон измерения дальности	50 – 300 м
Ширина диаграммы направленности	0,003×0,003 рад
Время измерения	0,27 с
Контролируемый поток	встречный, попутный

Класс лазерной безопасности 1 (по-видимому, определенный по ГОСТ Р 50723 как и для «ЛИСД-2Ф», авт.)».

Вопреки требованию п. 6.4 из СН [17] в перечнях технических характеристик рассматриваемых ЛДС-ИК не приведены значения параметров генерируемого ЛИ, имеющих определяющее значение для классификации этих ЛИЗ. Не указана ни длина

волны генерируемого ЛИ, ни энергия импульса, ни средняя мощность серии генерируемых импульсов ЛИ, а также не указана длительность импульсов и частота их повторения.

Во вводной части РЭ [121] имеется следующее разъяснение: *«В соответствии с ГОСТ Р 50723-94 изделие относится к I классу (лазерное излучение полностью безопасно для потребителя)»*. В настоящее время вместо ГОСТ Р 50723 действует ГОСТ 31581 – 2012.

Соответствующая поясняющая надпись, убеждающая потребителя, что перед ним лазерное изделие I класса опасности, размещена на «ЛИСД-2Ф» (см. рисунок А.12). При этом разработчики в рекламных материалах прямо пишут, что «ЛИСД-2Ф» *«полностью безопасен для глаз»*. Это утверждение вызывает определенные сомнения, поскольку, как показано в § 1.3, *ЛИЗ, отнесенные к классу I по ГОСТ Р 50723 (в настоящее время к ГОСТ 31581 – 2012) якобы «безопасному для глаз» в большинстве случаев следует относить к опасному для глаз классу II по СН* [17]. Чтобы «ЛИСД-2Ф» мог быть отнесен к безопасному классу I по СН необходимо выполнение условия $P \leq P_{\text{кли}} = P_{\text{пду}}$.

Определим значение $P_{\text{пду}}$ для глаза. Исходя из описанного выше режима генерации ЛИ, *можно считать, что глаз подвергается действию непрерывного ЛИ с $\lambda = 905$ нм, имеющего мощность равную средней мощности P всей последовательности излучаемых импульсов*. Предполагаем, что измеритель работает в автоматическом режиме (режим «А»), тогда можно считать, что время воздействия ЛИ на глаза человека, попавшего в лазерный пучок равно времени измерения, указанного в п. 1.2.15 РЭ [121], т.е. $t_{\text{в}} = 0,7$ с. Тогда по формуле, приведенной в таблице 3.4 СН [18], получаем $P_{\text{пду}} = \dots = 0,34$ мВт. Однако, вполне вероятно, что оператор-инспектор будет проводить не одно измерение, а повторять их в течение интервала времени, превышающего 10 с. При оценке $P_{\text{пду}}$ для невидимой глазом $\lambda = 905$ нм принимаем время воздействия непрерывного ЛИ на глаз $t_{\text{в}} = 10$ с. Для этого случая по таблице 1.1 (т.е. по таблице 3.4 СН) получаем $P_{\text{пду}} = 0,14$ мВт.

Таким образом, чтобы отнести «ЛИСД-2Ф» к действительно безопасному классу I по СН необходимо выполнение условия $P \leq 0,14$ мВт, что подтвердить или опровергнуть довольно сложно, поскольку данные о значении P разработчик не приводит.

Проведем сравнение «ЛИСД-2Ф» с ИК лазерным прицелом-дальномером (ЛПР-ИК) марки «Рысь-ЛД» (рисунок А.14). Приведем отдельные технические характеристики ЛИЗ «Рысь-ЛД» из рекламного проспекта.

«Длина волны излучения, мкм	0,905»;
«Диапазон измерения дальности, м	от 50 до 700».



Рисунок А.14 – Лазерный прицел-дальномер «Рысь-ЛД»

Заметим, что мощность излучения и другие параметры ЛИ, требуемые в соответствии с п. 4.6 СН, разработчики ЛПР-ИК марки «Рысь-ЛД» также не приводят. Не приводится и класс опасности ЛПР-ИК

В технических характеристиках «ЛИСД-2Ф» указано, что максимальная дальность измерения $l_{\text{ЛДС-ИК max}} \approx 1000$ м. В свою очередь, для ЛПР-ИК марки «Рысь-ЛД» $l_{\text{ЛД-ИК max}} = 700$ м, т.е. несколько меньше, чем у «ЛИСД-2Ф». Это означает, что мощность ЛИ у этого ЛПР-ИК меньше, чем у «ЛИСД-2Ф», однако при этом *разработчики этого дальномера снабдили свое ЛИЗ отчетливым знаком лазерной опасности (ЗЛО) (рисунок А.14), что говорит об опасности генерируемого ЛИ и о том, что прицел-дальномер относится к классу II по СН [17] и, по меньшей мере, к классу 3R по СанПин [18].* Вряд ли давно разработанное изделие «ЛИСД-2Ф» обладает существенно бóльшей чувствительностью к принимаемому отраженному ЛИ чем более современное изделие «Рысь-ЛД», т.е. вряд ли можно считать, что мощность излучения «ЛИСД-2Ф» почти на порядок меньше, чем у ЛИЗ «Рысь-ЛД». С достаточной долей уверенности можно констатировать, что *«ЛИСД-2Ф» незначительно отличается по мощности ЛИ от изделия «Рысь-ЛД», а следовательно также относится к классу II по СН [17] и к классу 3R по СанПин. Утверждение, что «ЛИСД-2Ф» «полностью безопасен для глаз» является ошибочным и вводит потребителя (т.е. сотрудников ГИБДД) в заблуждение!*

Обратим внимание на ЛДС-ИК марки «ЛУЧ-М», на котором отчетливо виден ЗЛО (рисунок А.13б). Однако в рекламном проспекте на «ЛУЧ-М» указано, что изделие относится к безопасному классу 1. О какой же опасности предупреждает знак, если изделие «безопасно» по присвоенному 1-му классу? Скорее всего, разработчики «ЛУЧ-М» сомневались в безопасности излучения своего ЛИЗ и разместили на нем ЗЛО «на всякий случай». Таким образом, они оказались совершенно правы, поскольку *«ЛУЧ-М» так же, как и «ЛИСД-2Ф», следует отнести к классу II по СН и к классу 3R по СанПин.*

Определим расстояние до границы ЛОЗ $Z_{\text{ЛОЗ}}$ для «ЛИСД-2Ф» и «ЛУЧ-М», полагая, что средняя выходная мощность ЛИ равна значению первого КУ по ГОСТ Р 50723 (т.е. по стандарту ИЕС 60825-1). Таким образом считаем, что $P = P_{\text{КУ1 ГОСТ}} = P_{\text{АЕЛ1}} = 1,1 \text{ мВт}$ (см. таблицу 1.4). Примем, что диаметр лазерного пучка на выходе «ЛИСД-2Ф» $d_{\text{ли}} = 3$ мм. Для $P_{\text{пду}} = 0,14 \text{ мВт}$, $\Theta = 3 \cdot 10^{-3}$ рад по формуле (2.58) получаем $Z_{\text{ЛОЗ}} = 8,3 \text{ м}$. Для

подтверждения правильности применения формулы (2.58), справедливой лишь для дальней зоны пучка, необходимо проверить, что диаметр пучка $d_{\text{ЛОЗ}}$ на границе ЛОЗ превышает диаметр зрачка в условиях ночного зрения $d_{\text{ЗР}} = 7$ мм в 3,2 раза. Таким образом, необходимо выполнение условия $d_{\text{ЛОЗ}} \geq 3,2 d_{\text{ЗР}}$ или $d_{\text{ЛОЗ}} \geq 22,4$ мм. Для полученных значений $Z_{\text{ЛОЗ}}$ по формуле (2.59) получаем $d_{\text{ЛОЗ}} = 28$ мм. Условие дальней зоны выполняется и применение формулы (2.58) справедливо.

Лазерное излучение в области с радиусом около 8,5 м, вокруг центра выходного окна «ЛИСД-2Ф» может представлять опасность для глаз водителей ТС, попавших в эту зону.

По формулам (2.47), (2.52) для $\Theta = 3 \cdot 10^{-3}$ рад $d_{\text{ЛИ}} = 3$ мм получаем $Z_{\text{БЗ}} = 1,3$ м; $Z_{\text{СЗ}} = 6,5$ м.

Вычислим КСОЛ для $Z = 4$ м по формулам (2.48), (2.49) для гауссова пучка с параметрами $\Theta = 3 \cdot 10^{-3}$ рад, $d_{\text{ЛИ}} = 3$ мм. Для $P = 1,1$ мВт, $P_{\text{ЦДУ}} = 0,14$ мВт получаем $R_{\text{СОЛ}} = 2,8$. Для людей, имеющих возможность попасть в среднюю зону лазерного пучка «ЛИСД-2Ф» или «ЛУЧ-М» (например, для сотрудников ГИБДД, находящихся относительно недалеко от сотрудника, проводящего измерения), следует принять $R_{\text{СОЛ}} = 3$.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Условия труда водителей ТС, находящихся на расстоянии более $Z_{\text{ЛОЗ}}$ от «ЛИСД-2Ф» или «ЛУЧ-М», можно классифицировать как допустимые класса 2.

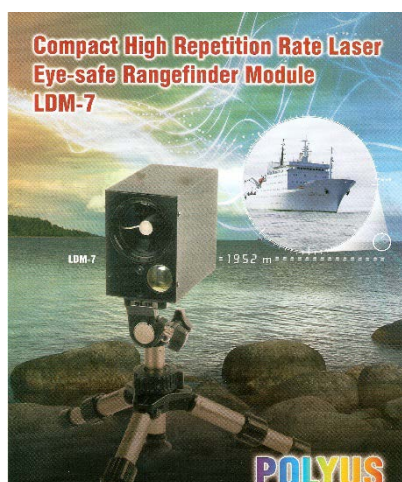
Условия труда водителей, находящихся на расстоянии равном или менее $Z_{\text{ЛОЗ}}$, можно классифицировать как вредные подкласса 3.2.

Условия труда сотрудников ГИБДД, находящихся в ближней и средней зоне действия «ЛИСД-2Ф» или «ЛУЧ-М», можно классифицировать как вредные подкласса 3.2.

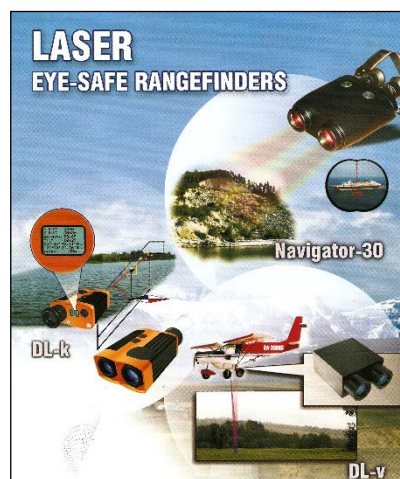
В реальной практике отсутствует возможность свести условия труда водителей к допустимым на расстоянии равном или менее $Z_{\text{ЛОЗ}}$ путем применения водителями средствами индивидуальной защиты глаз. Возможным способом решения вопроса обеспечения лазерной безопасности при использовании «ЛИСД-2Ф» или «ЛУЧ-М» является внесение в конструкцию измерителей ***устройства автоматического отключения ЛИ при дистанциях порядка $Z_{\text{ЛОЗ}}$.***

Кардинальным способом обеспечения ЛБ при использовании ИК лазерных дальномеров и дальномеров-скоростемеров является ***изменение рабочей длины волны этих устройств (порядка 900 нм) на давно освоенную в лазерной технике длину волны 1540 нм.*** Излучение с $\lambda = 1540$ нм не достигает сетчатки и может считаться безопасным для глаз (см. § 1.1, рисунки 1.5, 1.6). На рисунках А.15а,б показаны безопасные для глаз («еу-

safe») модели лазерных дальномеров класса I по СН, работающих на $\lambda = 1540$ нм, разработанные НИИ «Полюс». Не совсем понятно, по какой причине разработчики «ЛИСД-2Ф», «ЛУЧ-М» из того же «Полюса» до сих пор их не модернизируют эти ЛДС-ИК путем введения в схему безопасных для глаз ЛПД, генерирующих ЛИ на $\lambda = 1540$ нм. *При работе модернизированных «ЛИСД-2Ф», «ЛУЧ-М» на $\lambda = 1540$ нм будут обеспечены допустимые (класс 2) условия труда водителей ТС и сотрудников ГИБДД.*



а



б

Рисунок А.15 – Безопасные для глаз («eye-safe») ИК лазерные дальномеры:
а – LDM-7, б – Navigator-30 и DL-k, DL-v

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Лазерная продукция гражданского назначения способная создать угрозу безопасности эксплуатации транспортных средств. Аспекты безопасности при эксплуатации на открытых пространствах**Б.1 Лазерные указки «Green laser pointer»**

Лазерные целеуказатели гражданского назначения, работающие в видимом спектральном диапазоне 380 – 750 нм, называемые в обиходе «лазерными указками», отечественная промышленность не выпускает. Практически все модели ЛУК поступают в РФ из Китая. Естественно, китайские производители не обязаны следовать требованиям НД по ЛБ, действующим на территории РФ, поэтому соблюдение требований лазерной безопасности рассматриваемых ЛИЗ должны обеспечивать, прежде всего, фирмы-поставщики. Автор проанализировал более 30-ти интернет-сайтов рекламирующих различные модели ЛУК, и выяснил, что ни на одном из них не приведены значения всех «лазерных» параметров обязательное наличие которых в любой сопутствующей документации регламентировано в п. 4.6 СН 5804 – 91 [17] и пп. 8.4.1.2 СанПин 2.2.4.3359 – 16 [18]. В частности, не указывается значение диаметра лазерного пучка на выходе ЛУК $d_{\text{ли}}$ (мм) и угол расходимости лазерного пучка Θ (рад). Как правило, указываются лишь длина волны и мощность излучения P и иногда указывается некая умозрительная «дальность действия», измеряемая десятками километров.

Редким исключением является рекламная информация [122] о довольно распространенной ЛУК модели «Green laser pointer», для которой в [122] приведены значения $d_{\text{ли}} = 1$ мм и $\Theta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ рад. В [122] рекламируются лазерные указки, излучающие на $\lambda = 532$ нм, имеющие мощность ЛИ: 10, 20, 30, 50, 100, 200 мВт.

Общий вид ЛУК «Green laser pointer» приведен на рисунке Б.1.

С помощью таблицы 1.4 легко установить, что рассматриваемые ЛУК с мощностью ЛИ 10, 20, 30 и 50 мВт представляют собой опасные для глаз ЛИЗ класса II по СН [17] и класса 3В по СанПин [18]. *ЛУК с мощностью лазерного излучения 100 и 200 мВт следует классифицировать как весьма опасные ЛИЗ классов III по СН и 3В по СанПин. В соответствии с требованием пп. 8.4.2.11 СанПин применение ЛУК «Green laser pointer» на открытых пространствах без ограничения траектории пучка экраном для проецирования пятна лазерного излучения запрещено.*



Рисунок Б.1 – Лазерная указка «Green laser pointer»

В таблице Б.1 приведены значения $R_{\text{СОЛ}}$, $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$, $Z_{\text{ЛЮЗ}}$, $Z_{\text{ЗОС}}$ для ЛУК «Green laser pointer» с разной мощностью ЛЛ. Значения $R_{\text{СОЛ}}$ вычислены по формулам (2.48), (2.49); значения $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$, $Z_{\text{ЛЮЗ}}$ – по формулам (2.47), (2.52), (2.58); $Z_{\text{ЗОС}}$ – по формуле (3.13).

Т а б л и ц а Б.1 – Значения $R_{\text{СОЛ}}$, $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$, $Z_{\text{ЛЮЗ}}$, $Z_{\text{ЗОС}}$ для лазерных указок «Laser pointer»

P , мВт	10	20	30	50	100	200
$Z_{\text{БЗ}}$, м	4	4	4	4	4	4
$R_{\text{СОЛ}}$	от 100 до 87	от 200 до 174	от 300 до 261	от 500 до 435	от $1 \cdot 10^3$ до 870	от $2 \cdot 10^3$ до $1,7 \cdot 10^3$
$Z_{\text{СЗ}}$, м	14	14	14	14	14	14
$R_{\text{СОЛ}}$	от 87 до 18	от 174 до 36	от 261 до 54	от 435 до 90	от 870 до 180	от $1,7 \cdot 10^3$ до 360
$Z_{\text{ЛЮЗ}}$, м	66	93	114	148	210	296
$R_{\text{СОЛ}}$	от 18 до 1	от 36 до 1	от 54 до 1	от 90 до 1	от 180 до 1	от 360 до 1
$Z_{\text{ЗОС}}$, м	106	149	182	237	336	474

По результатам, приведенным в таблице Б.1, можно сделать следующие выводы по ПСОУТ водителей наземных ТС и пилотов ВС при применения ЛУК «Laser pointer» на ОНР.

При использовании на открытых пространствах лазерных указок «Laser pointer» с мощностью излучения $P = 10, 20, 30, 50$ мВт для водителей наземного транспорта, находящихся в ближней и средней зонах лазерного пучка, создаются вредные условия труда подкласса 3.4; при применении ЛУК с мощностью $P = 100, 200$ мВт для водителей могут создаваться опасные условия труда класса 4.

При использовании на ОНР ЛУК с мощностью $P = 100, 200$ мВт для пилотов ВС, совершающих взлет или посадку и находящихся в дальней зоне пучка, могут создаваться вредные условия труда подклассов 3.2, 3.3.

Применение любых лазерных указок «Laser pointer» на ОНР создает опасность временного ослепления водителей наземных транспортных средств; при применении

ЛУК с мощностью $P = 50, 100, 200$ мВт возникает опасность временного ослепления лазерным пучком пилотов воздушных судов совершающих взлет или посадку.

Б.2 Лазерные прицелы «ЛЦУ-ОМ-1Л», «EL 888077», «Yukon Sight Mark»

Большой популярностью пользуются лазерные прицелы (ЛПП) для охотничьего и спортивного оружия, генерирующие ЛИ на «красной» длине волны в диапазоне 630 – 650 нм. К таким ЛПП относятся, например, лазерные прицелы марки «ЛЦУ-ОМ-1Л» [123] (рисунок Б.2а). В последние годы появились ЛПП, излучающие лазерные пучки на «зеленой» длине волны $\lambda = 532$ нм (например, прицел марки «EL 888077» [123], рисунок Б.2б). «Красные» ЛПП работают на основе лазерного полупроводникового диода, а «зеленые» ЛПП – на основе портативного твердотельного лазера с диодной накачкой и удвоением частоты (см. рисунок 2.12). К категории ЛПП относятся также ЛИЗ, предназначенные для пристрелки стрелкового оружия, т.н. «лазерные патроны». Эти ЛПП представляют собой лазерные модули, выполненные в форме патрона и имеющие размер патрона определенного калибра (например, лазерный патрон марки «Yukon Sight Mark 7,62x39 Laser Bore Sights» [124], рисунок Б.2в). Эти ЛПП размещаются в казенной части ствола и направляют наружу узкий лазерный пучок, ось которого с высокой точностью совпадает с осью ствола.



Рисунок Б.2 – Лазерные прицелы: а – «ЛЦУ-ОМ-1Л» [123], б – «EL 888077» с комплектом крепежных узлов [123], в – лазерный патрон «Yukon Sight Mark 7,62x39 Laser Bore Sights» [124]

В перечнях технических характеристик ЛПП различных марок приведены, как правило, значения двух параметров требующихся для оценки степени опасности лазерного излучения: λ и P . Кроме того указывается максимальная дальность прицеливания $l_{\text{ЛПП max}}$ (м). Угол расходимости Θ и диаметр лазерного пучка на выходе ЛПП $d_{\text{ли}}$, вопреки требованию п. 4.6 СН [17] и пп. 8.4.1.2 СанПин [18], не указываются. Однако, как правило, указывается размер пятна облучения $d_{\text{п}}$ (мм) на поверхности, удаленной на определенную дистанцию

прицеливания $l_{\text{ПР}}$ (м). Используя эти параметры, можно определить угол расходимости пучка по формуле $\Theta = 10^{-3} d_{\text{П}} / l_{\text{ПР}}$. Для некоторых марок ЛПР (к сожалению, для крайне небольшого количества) приведен класс опасности.

В таблице Б.2 приведены значения параметров излучения ЛПР, показанных на рисунке Б.2, а также классы ЛПР по степени опасности, определенные по СН (таблица 1.4) и по СанПин. Все рассматриваемые ЛПР относятся к классу II по СН [17]. Значения P , приведенные в таблице Б.2, близки к значению верхнего классификационного уровня $P_{\text{КУ } 3\text{R}} = 5$ мВт для ЛИЗ класса 3R по СанПин [18]. Это дает возможность отнести ЛПР к классу 3R по СанПин. Это, в свою очередь, означает, что в соответствии с **требованием пп. 8.4.2.11 СанПин применение ЛПР рассматриваемых марок, должно быть согласовано с органами Роспотребнадзора, а, следовательно, свободная продажа этих ЛПР должна быть прекращена.**

Т а б л и ц а Б.2 – Параметры и характеристики ЛПР необходимые для оценки степени опасности лазерного излучения

Марка ЛПР	λ , нм	P , мВт	$l_{\text{ПР max}}$, м	$d_{\text{П}}$, мм	$l_{\text{ПР}}$, м	Θ , рад	$Z_{\text{ЛОЗ}}$, м	$Z_{\text{ЗОС}}$, м	Класс опасности**
«ЛЦУ-ОМ-1L» [123]	635	≥ 4	Н.у.	25	25	10^{-3}	41,3	54,8	Н.у. II 3R
«EL 888077» [123]	532	Н.у. 5*	700	Н.у.	Н.у.	Н.у. 10^{-3} *	67,0	108,0	Н.у. II 3R
«Yukon Sight Mark» [124]	632 – 650	< 5	183 м (200 yards)	50	91,44 (100 yards)	$5 \cdot 10^{-4}$	93,0	123,0	II 3R

*Экспертная оценка.
** II – по СН 5804 – 91; 3R – по СанПин 2.2.4.3359 – 16.
Пр и м е ч а н и е – Н.у. – значение параметра не указано в источнике информации.

Значения $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$ для ЛПР, показанных на рисунке Б.2, вычисляем по формулам (2.47), (2.52), полагая $d_{\text{ЛИ}} = 3$ мм. Получаем: $Z_{\text{БЗ}} = 4$ м, $Z_{\text{СЗ}} = 19$ м для ЛПР «ЛЦУ-ОМ-1L» и «EL 888077»; $Z_{\text{БЗ}} = 8$ м, $Z_{\text{СЗ}} = 40$ м для лазерного патрона «Yukon Sight Mark». Значения $R_{\text{СОЛ}}$ для ЛПР, излучающих лазерные пучки ТЕМ₀₀ моды, вычисляем по формулам (2.48), (2.49). Для расстояния $Z = 4$ м от выходного окна ЛПР получаем: $R_{\text{СОЛ max}} = 17$ для «ЛЦУ-ОМ-1L»; $R_{\text{СОЛ max}} = 43$ для «EL 888077»; $R_{\text{СОЛ max}} = 25$ для «Yukon Sight Mark».

В таблице Б.2 приведены значения $Z_{\text{ЛОЗ}}$, вычисленные по формуле (2.58) для ЛПР, показанных на рисунке Б.2. Для ЛПР марки «EL 888077», работающего на $\lambda = 532$ нм, в [123] не указано значение P и значения параметров $d_{\text{П}}$ и Θ . Принимаем в качестве экспертной оценки для ЛПР «EL 888077» $P = 5$ мВт, $\Theta = 10^{-3}$ рад; тогда по формуле (2.58) получаем $Z_{\text{ЛОЗ}} = 67$ м.

Для вычисления $Z_{30С}$ для ЛПР, работающих на $\lambda = 635$ нм (рисунки Б.2а, в), определяем коэффициент относительной эффективности глаза по формуле $k_v(635) = V(532)/V(635)$, где $V(532) = 0,883$, $V(635) = 0,265$ – значения спектральной световой эффективности для длин волн 532 нм и 635 нм для случая дневного зрения, приведенные в публикации [94]. Поясним, что при определении $Z_{30С}$ автор принимает условия дневного зрения, поскольку днем световая чувствительность глаза на «красных» длинах волн почти в 8 раз выше его чувствительности в условиях низкой освещенности (ночное зрение). На $\lambda = 532$ нм световая чувствительность глаза всего в 1,2 раза превышает чувствительность в условиях ночного зрения. При этом автор считает, что при наибольшей дневной чувствительности сетчатки диаметр зрачка глаза все равно соответствует условиям ночного зрения, т.е. $d_{зр} = 7$ мм. Эти условия являются наихудшими с позиции лазерной безопасности. С учетом выше сказанного получаем $k_v(635) = 3,33$.

По формуле (3.13) для пучка TEM_{00} моды с $\lambda = 635$ нм находим $Z_{30С} = 2,74 \cdot 10^{-2} \Theta \cdot P^{1/2}$ (м), где P – мощность ЛИ, генерируемого лазерным прицелом, выраженная в мВт. Для $\Theta = 10^{-3}$ рад получаем $Z_{30С} = 27,4P^{1/2}$; для $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад $Z_{30С} = 54,8P^{1/2}$. Значения $Z_{30С}$ для ЛПР, показанных на рисунке Б.2, приведены в таблице Б.2.

По результатам, приведенным в таблице Б.2, и по результатам вычислений $R_{СОЛ\ max}$, приведенным выше, можно сделать следующие выводы по ПСОУТ водителей наземных ТС и пилотов ВС при применения ЛПР на ОПР.

При использовании на ОПР лазерных прицелов «ЛЦУ-ОМ-1Л», «EL 888077», «Yukon Sight Mark» для водителей наземного транспорта, находящихся в ближней зоне лазерного пучка, могут создаваться вредные условия труда подкласса 3.3.

Применение ЛПР на ОПР создает опасность временного ослепления водителей наземных транспортных средств.

Применение лазерных прицелов на ОПР не представляет угрозы эксплуатации воздушных судов совершающих взлет или посадку.

Б.3 Лазерные дальномеры-рулетки «Leica Disto A5», «Stabila LE 20», «Agatec DM100»

В последнее время в сфере строительства (рисунок Б.3а) и в быту (рисунок Б.3б) широко применяются лазерные дальномеры-рулетки (ЛДР), которые представляют собой малогабаритные лазерные дальномеры, работающие на «красной» длине волны $\lambda = 635$ нм. ЛДР формируют хорошо видимое пятно лазерного излучения на поверхности объекта, до которого измеряется расстояние (дальность). ЛДР при измерениях размещается

в руке оператора, проводящего измерения (рисунок Б.3). ЛДР позволяют проводить высокоточные измерения, не привлекая к этому процессу второго участника.

На отечественном рынке представлено довольно много моделей ЛДР от различных зарубежных производителей, как сравнительно дорогие с большим диапазоном измерений, малой погрешностью, широким набором функций и большим количеством измерений с одним комплектом батарей (например, ЛДР марки «Leica Disto A5» [125], рисунок Б.4а), так и относительно недорогие с меньшим диапазоном и набором возможностей, но вполне удовлетворяющие бытовым потребностям обычных граждан (например, ЛДР марок «Stabila LE 20» [126], «Agatec DM100» [127], рисунок Б.4б, в). Для измерений больших дистанций дополнительно нужно использовать отражатель и штатив.



а



б

Рисунок Б.3 – Применение лазерных дальномеров-рулеток: а – в строительстве, б – в быту



а



б



в

Рисунок Б.4 – Лазерные дальномеры-рулетки: а – «Leica Disto A5» [125], б – «Stabila LE 20» [126], в – «Agatec DM100» [127]

В перечнях технических характеристик ЛДР различных марок приведены, как правило, значения двух параметров ЛИ, требующихся для оценки СОЛ: λ и P , а также указывается диапазон измерения расстояний $l_{\text{ЛДР}}$ (м). Угол расходимости ЛИ Θ и диаметр лазерного пучка на выходе ЛДР $d_{\text{ЛИ}}$ вопреки требованию п. 4.6 СН [17] не указываются. Однако указывается размер пятна облучения $d_{\text{П}}$ (мм) на поверхности, удаленной на

определенную дистанцию измерения $l_{\text{ИЗМ}}$ (м). Используя эти параметры, можно определить угол расходимости лазерного пучка по формуле $\Theta = 10^{-3} d_{\text{П}} / l_{\text{ИЗМ}}$. В таблице Б.3 приведены значения параметров излучения ЛДР, показанных на рисунке Б.4.

Будем считать, что мощность ЛИ для всех ЛДР $P = 1$ мВт. Это означает, что все ЛДР являются ЛИЗ класса II – по СН 5804 – 91; и класса 2 – по СанПин 2.2.4.3359 – 16.

Значения $Z_{\text{БЗ}}$, $Z_{\text{СЗ}}$ для ЛДР, показанных на рисунке Б.4, вычисляем по формулам (2.47), (2.52), полагая $d_{\text{ЛИ}} = 1$ мм. Получаем: $Z_{\text{БЗ}} = 10$ м, $Z_{\text{СЗ}} = 36$ м для ЛДР марок «Leica Disto A5», «Agatec DM100»; $Z_{\text{БЗ}} = 12$ м, $Z_{\text{СЗ}} = 43$ м для ЛДР марки «Stabila LE 20». Значения $R_{\text{СОЛ}}$ для ЛДР, излучающих лазерные пучки ТЕМ₀₀ моды, вычисляем по формуле (2.48). Для расстояния $Z = 4$ м от выходного окна ЛДР в формуле (2.48) принимаем $k_{\text{ЗРГ}} = 1$. Для всех ЛДР получаем $R_{\text{СОЛ max}} = 5$.

Т а б л и ц а Б.3 – Параметры и характеристики ЛДР необходимые для оценки степени опасности лазерного излучения

Марка ЛДР	λ , нм	P , мВт	$l_{\text{ЛДР}}$, м	$d_{\text{П}}$, мм/ $l_{\text{ИЗМ}}$, м	Θ , рад	$Z_{\text{ЛОЗ}}$, м	$Z_{\text{СОС}}$, м	Класс опасности**
«Leica Disto A5»	635	Н.у. > 1*	0,05 – 200	6, 30, 60/ 10, 50, 100	$6 \cdot 10^{-4}$	32	42	Н.у. II * 2*
«Stabila LE 20»	635	< 1	0,2 – 30	8/10 25/50	$8 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-4}$	38	50	Н.у. II * 2*
«Agatec DM100»	635	< 1	0,1 – 30	6/10 30/50	$6 \cdot 10^{-4}$	32	42	Н.у. II * 2*

*Экспертная оценка.

**II – класс по СН 5804 – 91; 2 – класс по СанПин 2.2.4.3359 – 16.

П р и м е ч а н и я:

1 Н.у. – значение параметра не указано в источнике информации.

2 Значение $Z_{\text{ЛОЗ}}$ для «Stabila LE 20» вычислено для $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад.

Вычислим $Z_{\text{СОС}}$ по формуле $Z_{\text{СОС}} = k_{\text{ЗОС/ЛОЗ}} Z_{\text{ЛОЗ}}$, где $k_{\text{ЗОС/ЛОЗ}} = Z_{\text{СОС}} / Z_{\text{ЛОЗ}}$. Используем значения $Z_{\text{СОС}}$ и $Z_{\text{ЛОЗ}}$ из таблицы Б.2 для «красных» лазерных прицелов «ЛЦУ-ОМ-1Л» и «Yukon Sight Mark». Получаем $k_{\text{ЗОС/ЛОЗ}} = 1,3$.

По результатам, приведенным в таблице Б.3, и по результату вычислений $R_{\text{СОЛ max}}$, приведенному выше, можно сделать следующие выводы по ПСОУТ водителей наземных ТС и пилотов ВС при применения ЛДР на ОПР.

При использовании на ОПР ЛДР марок «Leica Disto A5», «Stabila LE 20», «Agatec DM100» для водителей наземного транспорта, находящихся в ближней зоне лазерного пучка, могут создаваться вредные условия труда подкласса 3.2.

Применение ЛДР на ОПР создает опасность временного ослепления водителей наземных транспортных средств.

Применение ЛДР на ОПР не представляет угрозы эксплуатации воздушных судов.

Приложение В

Нормативные документы МЭК по лазерной безопасности

Т а б л и ц а В.1 – Нормативные документы серии IEC 60825 и соответствующие национальные стандарты РФ

Обозначение и наименование документа серии МЭК 60825 на английском языке	Обозначение и наименование документа серии МЭК 60825 на русском языке*	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта РФ
1. IEC 60825-1:2014 «Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements»	МЭК 60825-1:2014 «Безопасность лазерной продукции. Часть 1. Классификация и требования к аппаратуре»	ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования, требования и руководство для пользователей (IEC 60825-1:2007, IDT ¹)».
2. IEC 60825-2:2004 «Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fiber communication systems (OFCS)»	МЭК 60825-2:2004 «Безопасность лазерной продукции. Часть 2. Безопасность волоконно-оптических систем связи (ВОС)»	ГОСТ IEC 60825-2 – 2013 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 2. Безопасность волоконно-оптических систем связи»
3. IEC/TR 60825-3: 2008 «Safety of laser products – Part 3: Guidance for laser displays and shows»	МЭК/ТР 60825-3:2008 «Безопасность лазерной продукции. Часть 3. Руководство по применению лазерных дисплеев и по проведению лазерных шоу»	ГОСТ Р 54839 – 2011/IEC/TR 60825-3: 2008 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 3. Руководящие указания по применению лазеров для зрелищных мероприятий»
4. IEC 60825-4:2006 «Safety of laser products – Part 4: Laser guards»	МЭК 60825-4:2006 «Безопасность лазерной продукции. Часть 4. Средства защиты от лазерного излучения»	ГОСТ Р МЭК 60825-4 – 2011 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 4. Средства защиты от лазерного воздействия»
5. IEC 60825-5:2003 «Safety of laser products – Part 5: Manufacturers checklist for IEC 60825-1»	МЭК 60825-5:2003 «Безопасность лазерной продукции. Часть 5. Контрольный перечень к МЭК 60825-1 для изготовителей»	ГОСТ Р 54842 – 2011/IEC/TR 60825-5: 2003 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 5. Контрольный перечень к МЭК 60825-1 для изготовителей»
6. IEC/TR 60825-8:2006 «Safety of laser products – Part 8: Guidelines for the safe use of laser beams on humans»	МЭК 60825-8:2006 «Безопасность лазерной продукции. Часть 8. Руководство по безопасному применению лазерных пучков направленных на людей»	ГОСТ Р 54841 – 2011/IEC/TR 60825-8:2006 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 8. Руководящие указания по безопасному использованию лазерных пучков для человека».
7. IEC/TR 60825-9:1999 «Safety of laser products – Part 9: Compilation of maximum permissible exposure to incoherent optical radiation»	МЭК/ТР 60825-9:1999 «Безопасность лазерной продукции. Часть 9. Определение предельно допустимых уровней некогерентного оптического излучения методом компилирования».	ГОСТ IEC 60825-9 – 2009 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 9. Компиляция максимально допустимой экспозиции некогерентного оптического излучения»

Продолжение таблицы В.1

8. IEC/TR 60825-10:2002 «Safety of laser products – Part 10: Application guidelines and explanatory notes to IEC 60825-1»	МЭК/ТР 60825-10:2002 «Безопасность лазерной продукции. Часть 10. Руководство по применению и пояснительные замечания к МЭК 60825-1»	ГОСТ Р 54838 – 2011/IEC/TR 60825-10:2002 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 10. Руководство по применению и пояснительные замечания к МЭК 60825-1»
9. IEC 60825-12:2004 «Safety of laser products – Part 12: Safety of free space optical communication systems used for transmission of information»	МЭК 60825-12:2004 «Безопасность лазерной продукции. Часть 12. Безопасность систем оптической связи в свободном пространстве, используемых для передачи информации»	ГОСТ IEC 60825-12 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 12. Безопасность систем оптической связи в свободном пространстве, используемых для передачи информации»
10. IEC/TR 60825-13:2006 «Safety of laser products – Part 13: Measurements for classification of laser products»	МЭК/ТР 60825-13:2006 «Безопасность лазерной продукции. Часть 13. Измерения для классификации лазерной продукции»	ГОСТ Р 54836 – 2011/IEC/TR 60825-13:2006 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 13. Измерения, для классификации лазерной аппаратуры».
11. IEC/TR 60825-14:2004 «Safety of laser products – Part 14: A user's guide»	МЭК/ТР 60825-14:2004 «Безопасность лазерной продукции. Часть 14. Руководство для пользователя».	ГОСТ Р 54840 – 2011/IEC/TR 60825-14:2004 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 14. Руководство пользователя».
* Перевод автора. 1) ГОСТ IEC 60825-1 – 2013 является стандартом идентичным (IDT) стандарту IEC 60825-1:2007, но неидентичным стандарту IEC 60825-1:2014.		

Т а б л и ц а В.2 – Формулы для вычисления MPE для роговицы глаза по стандарту IEC 60825-1:2007

Wavelength λ nm (Длина волны λ , нм)	Exposure time t s (Длительность экспозиции t , с)									
	от 10^{-13} до 10^{-11}	от 10^{-11} до 10^{-9}	от 10^{-9} до 10^{-7}	от 10^{-7} до $1,8 \cdot 10^{-6}$	от $1,8 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$	от $5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-3}	от 10^{-3} до 10	от 10 до 10^2	от 10^2 до $3 \cdot 10^4$	
400–450	$1,5 \cdot 10^{-4}$ $J \cdot m^{-2}$	$2,7 \cdot 10^4 t^{0,75}$ $J \cdot m^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3} J \cdot m^{-2}$	$18 t^{0,75} J \cdot m^{-2}$					100 $J \cdot m^{-2}$	C_3 $W \cdot m^{-2}$
450–500									100 C_3 $J \cdot m^{-2}$	C_3 $W \cdot m^{-2}$
500–700									10 $W \cdot m^{-2}$	10 $W \cdot m^{-2}$
700 –1050	$1,5 \cdot 10^{-4} C_4$ $J \cdot m^{-2}$	$2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_4$ $J \cdot m^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3} C_4$ $J \cdot m^{-2}$	$18 t^{0,75} C_4 J \cdot m^{-2}$					10 $C_4 C_7$ $W \cdot m^{-2}$	
1050 –1400	$1,5 \cdot 10^{-3} C_7$ $J \cdot m^{-2}$	$2,7 \cdot 10^5 t^{0,75} C_7$ $J \cdot m^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} C_7$ $J \cdot m^{-2}$			$90 t^{0,75} C_7 J \cdot m^{-2}$		1000 $W \cdot m^{-2}$		
1400 –1500	$10^{12} W \cdot m^{-2}$		$10^3 J \cdot m^{-2}$			$5600 t^{0,25}$ $J \cdot m^{-2}$		1000 $W \cdot m^{-2}$		
1500 –1800	$10^{13} W \cdot m^{-2}$		$10^4 J \cdot m^{-2}$							
1800 –2600	$10^{12} W \cdot m^{-2}$					$5600 t^{0,25}$ $J \cdot m^{-2}$				
2600 – 10^6	$10^{11} W \cdot m^{-2}$		100 $J \cdot m^{-2}$	$5600 t^{0,25} J \cdot m^{-2}$			1000 $W \cdot m^{-2}$			
Пр и м е ч а н и е – В таблице 2 используются следующие поправочные коэффициенты: $C_3 = 10^{0,02 (\lambda - 450)}$; $C_4 = 10^{0,02 (\lambda - 700)}$; $C_7 = 1$ для спектрального интервала (СПИ) 700 – 1050 нм; $C_7 = 10^{0,015 (\lambda - 1150)}$ для СПИ 1050 – 1400 нм.										

Т а б л и ц а В.3 – Пределы доступной эмиссии для лазерной продукции классов 1 и 1М по IEC 60825 – 1:2007

Wavelength λ nm (Длина волны λ , нм)	Emission duration t s (Длительность излучения t , с)										
	от 10^{-13} до 10^{-11}	от 10^{-11} до 10^{-9}	от 10^{-9} до 10^{-7}	от 10^{-7} до $1,8 \cdot 10^{-5}$	от $1,8 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$	от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-3}	от 10^{-3} до 0,35	от 0,35 до 10	от 10 до 10^2	от 10^2 до $3 \cdot 10^4$	
400–450	$5,8 \cdot 10^{-9}$ J	$1,0 \cdot t^{0,75}$ J	$2 \cdot 10^{-7}$ J		$7 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,75}$ J					$3,9 \cdot 10^{-3}$ J	$3,9 \cdot 10^{-5}$ $\times C_3$ W
450–500										$3,9 \cdot 10^{-4}$ W	$3,9 \cdot 10^{-5}$ $\times C_3$ W
500–700										$3,9 \cdot 10^{-4}$ W	$3,9 \cdot 10^{-4}$ W
700 –1050	$5,8 \cdot 10^{-9} C_4$ J	$1,0 \cdot t^{0,75}$ C_4 J	$2 \cdot 10^{-7} C_4$ J		$7 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,75} C_4$ J					$3,9 \cdot 10^{-4} C_4 C_7$ W	
1050 –1400	$5,8 \cdot 10^{-8} C_7$ J	$10,4 \cdot t^{0,75}$ C_7 J	$2 \cdot 10^{-6} C_7$ J			$3,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,75} C_7$ J					
1400 –1500	$8 \cdot 10^5$ W		$8 \cdot 10^{-4}$ J			$4,4 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ J		$10^{-2} t$ J	$1,0 \cdot 10^{-2}$ W		
1500 –1800	$8 \cdot 10^6$ W		$8 \cdot 10^{-3}$ J					$11,8 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,75}$ J			
1800 –2600	$8 \cdot 10^5$ W		$8 \cdot 10^{-4}$ J			$4,4 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ J		$10^{-2} t$ J			
2600 –4000	$8 \cdot 10^4$ W		$8 \cdot 10^{-5}$ J	$4,4 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ J					$10^{-2} t$ J	$1,0 \cdot 10^{-2}$ W	
4000 – 10^6	10^{11} W·m ⁻²		100 J·m ⁻²	$5600 t^{0,25} \cdot J \cdot m^{-2}$					1000 W·m ⁻²		

Таблицы для определения ПДУ и классов лазерных изделий по СН 5804 – 91

Т а б л и ц а Г.1 – СН 5804 – 91. Таблица 3.3 Соотношения для определения $W_{\text{ПДУ}}$ при однократном воздействии на глаза коллимированного лазерного излучения в спектральном диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм). Длительность воздействия меньше 1 с. Ограничивающая апертура – $7 \cdot 10^{-3}$ м

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$W_{\text{ПДУ}}$, Дж
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2,3 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,3 \cdot 10^{-11} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$5,9 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6,5 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6,5 \cdot 10^{-11} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$1,2 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$t \leq 2,5 \cdot 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,5 \cdot 10^{-10} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$3,0 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$7,4 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

Т а б л и ц а Г.2 – СН 5804 – 91. Таблица 3.4 Соотношения для определения $P_{\text{ПДУ}}$ при однократном воздействии на глаза коллимированного лазерного излучения в спектральном диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм). Длительность облучения больше 1 с. Ограничивающая апертура – $7 \cdot 10^{-3}$ м

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$P_{\text{ПДУ}}$, Вт
$380 < \lambda \leq 500$	$1,0 < t \leq 5,0 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$5,0 \cdot 10^{-2} < t \leq 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-3} / t$
	$t > 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-7}$
$500 < \lambda \leq 600$	$1,0 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$	$10^{-2} / t$
	$t > 10^4$	10^{-6}
$600 < \lambda \leq 700$	$1,0 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$	$2,0 \cdot 10^{-2} / t$
	$t > 10^4$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
$700 < \lambda \leq 750$	$1,0 < t \leq 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
	$t > 10^4$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
	$t > 10^4$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Продолжение таблицы Г.2

$750 < \lambda \leq 1000$	$1,0 < t \leq 10^4$	$3,0 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
	$t > 10^4$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$1,0 < t \leq 10^4$	$7,4 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Т а б л и ц а Г.3 – СН 5804 – 91. Таблица 4.1 Соотношения для определения классов лазеров (лазерных изделий) по степени опасности генерируемого излучения

Спектральный интервал, нм	Класс опасности	Режим генерации излучения		
		одиночные импульсы	серии импульсов (длительностью t_c)	непрерывное излучение ^{1), 2)}
$380 < \lambda \leq 750$	I	$W(\tau_{и}) \leq W_{ПДУ}(\tau_{и})$, если $d_{п} \leq 7$ мм; $W(\tau_{и}) \leq (d_{п}^2/49)W_{ПДУ}(\tau_{и})$, если $d_{п} \leq 7$ мм	$W_c(\tau_{и}) \leq W_{ПДУ c}(t_c)$, если $d_{п} \leq 7$ мм; $W_c(\tau_{и}) \leq (d_{п}^2/49)W_{ПДУ c}(t_c)$, если $d_{п} \leq 7$ мм	$P(t) \leq P_{ПДУ}(t)$, если $d_{п} \leq 7$ мм; $P(t) \leq (d_{п}^2/49)P_{ПДУ}(t)$, если $d_{п} \leq 7$ мм
- // -	II	$W(\tau_{и}) \leq 8 \cdot 10^2 W_{ПДУ}(\tau_{и})$	$W_c(\tau_{и}) \leq 8 \cdot 10^2 W_{ПДУ c}(t_c)$	$P(t) \leq 8 \cdot 10^2 P_{ПДУ}(t)$
- // -	III	$W(\tau_{и}) \leq \pi \cdot 10^4 W_{ПДУ к}(\tau_{и})$	$W_c(\tau_{и}) \leq \pi \cdot 10^4 W_{ПДУ c к}(t_c)$	$P(t) \leq \pi \cdot 10^4 P_{ПДУ к}(t)$
- // -	IV	$W(\tau_{и}) > \pi \cdot 10^4 W_{ПДУ к}(\tau_{и})$	$W_c(\tau_{и}) > \pi \cdot 10^4 W_{ПДУ c к}(t_c)$	$P(t) > \pi \cdot 10^4 P_{ПДУ к}(t)$
$750 < \lambda \leq 1400$	I	$W(\tau_{и}) \leq W_{ПДУ}(\tau_{и})$, если $d_{п} \leq 7$ мм; $W(\tau_{и}) \leq (d_{п}^2/49)W_{ПДУ}(\tau_{и})$, если $d_{п} \leq 7$ мм	$W_c(\tau_{и}) \leq W_{ПДУ c}(t_c)$, если $d_{п} \leq 7$ мм; $W_c(\tau_{и}) \leq (d_{п}^2/49)W_{ПДУ c}(t_c)$, если $d_{п} \leq 7$ мм	$P(t) \leq P_{ПДУ}(t)$, если $d_{п} \leq 7$ мм; $P(t) \leq (d_{п}^2/49)P_{ПДУ}(t)$, если $d_{п} \leq 7$ мм
- // -	II	$W(\tau_{и}) \leq 8 \cdot 10^2 W_{ПДУ}(\tau_{и})$	$W_c(\tau_{и}) \leq 8 \cdot 10^2 W_{ПДУ c к}(t_c)$	$P(t) \leq 8 \cdot 10^2 P_{ПДУ}(t)$
- // -	III	$W(\tau_{и}) \leq \pi \cdot 10^{-2} H_{ПДУ к}(\tau_{и})$	$W_c(\tau_{и}) \leq \pi \cdot 10^{-2} H_{ПДУ c к}(\tau_{и})$	$P(t) \leq \pi \cdot 10^{-2} E_{ПДУ к}(t)$
- // -	IV	$W(\tau_{и}) > \pi \cdot 10^{-2} H_{ПДУ к}(\tau_{и})$	$W_c(\tau_{и}) > \pi \cdot 10^{-2} H_{ПДУ c к}(\tau_{и})$	$P(t) > \pi \cdot 10^{-2} E_{ПДУ к}(t)$

¹⁾ Длительность воздействия для непрерывного излучения при использовании ПДУ для глаз $t = 0,25$ с в диапазоне свыше 380 до 750 нм (время мигательного рефлекса) и $t = 10$ с в диапазоне свыше 750 нм (наиболее вероятное время пребывания человека в состоянии полной неподвижности).

²⁾ Длительность воздействия для непрерывного излучения при использовании ПДУ для кожи $t = 10$ с.

П р и м е ч а н и я

1 – В таблице приведен фрагмент таблицы 4.1 из СН 5804 – 91, относящийся к спектральному диапазону от 380 до 1400 нм.

2 – Нижний индекс «к» означает, что используются значения ПДУ для кожи.

Приложение Д

**Таблицы для определения классов ЛИЗ
по ГОСТ 31581**

Т а б л и ц а Д.1. ГОСТ 31581 – 2012. Таблица А.1. Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 1

Длина волны, нм	Длительность излучения, с					
	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 3$	$3 - 10$
400 – 550	$2 \cdot 10^{-7} C_6$ Дж		$7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_6$ Дж			
550 – 700						
700 – 1050	$2 \cdot 10^{-7} C_4 C_6$ Дж		$7 \cdot 10^{-4} t^{0,75} C_4 C_6$ Дж			
1050 – 1400	$2 \cdot 10^{-6} C_4 C_6$ Дж			$3,5 \cdot 10^{-3} t^{0,75} C_6 C_7$ Дж		
Пр и м е ч а н и е – Для коллимированного пучка $C_6 = 1$; $C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)}$; $C_7 = 10^{0,18(\lambda - 1150)}$.						

Т а б л и ц а Д.2. ГОСТ 31581 – 2012. Таблица А.2. Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 2

Длина волны, нм	Длительность излучения, с	ДПИ для класса 2
400 – 700	$t < 0,25$	Такие же как ДПИ для класса 1
	$t \geq 0,25$	$C_6 10^{-3}$ Вт

Т а б л и ц а Д.3. ГОСТ 31581 – 2012. Таблица А.3. Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 3А

Длина волны, нм	Длительность излучения, с						
	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 0,25$	$0,25 - 3$	$3 - 10$
400 – 700	$10^{-6} C_6$ Дж		$3,5 \cdot 10^{-3} t^{0,75} C_6$ Дж				
700 – 1050	$10^{-6} C_4 C_6$ Дж		$3,5 \cdot 10^{-3} t^{0,75} C_4 C_6$ Дж				
1050 – 1400	$10^5 C_6 C_7$ Дж			$1,8 \cdot 10^2 t^{0,75} C_6 C_7$ Дж			
Пр и м е ч а н и е – Для коллимированного пучка $C_6 = 1$; $C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)}$; $C_7 = 10^{0,18(\lambda - 1150)}$.							

Т а б л и ц а Д.4. ГОСТ 31581 – 2012. Таблица А.4. Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 3В

Длина волны, нм	Длительность излучения, с		
	$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 0,25$	$0,25 - 3 \cdot 10^4$
400 – 700	$3 \cdot 10^7$ Вт	0,03 Дж для $t < 0,06$ с 0,5 Вт для $t \geq 0,06$ с	0,5 Вт
700 – 1050	$3 \cdot 10^7$ Вт	0,03 Дж для $t < 0,06$ с 0,5 Вт для $t \geq 0,06$ с	0,5 Вт
1050 – 1400	$1,5 \cdot 10^3$ Вт	0,15 Дж	0,5 Вт

Значения коэффициентов степени опасности и расстояний до границ ближних и средних зон а также до границ лазерно опасных зон

Т а б л и ц а Е.1 – Значения расстояний до границы ближней зоны $Z_{БЗ}$, м

Диаметр пучка в плоскости выходного окна $d_{ли}$, мм	Угол расходимости Θ , рад				
	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
2	10	5	2,5	1,0	0,5
3	8	4	2,0	0,8	0,4
4	6	3	1,5	0,6	0,3
5	4	2	1,0	0,4	0,2

Т а б л и ц а Е.2 – Формулы для вычисления коэффициентов степени опасности лазерного излучения на границе ближней зоны

Вид лазерного излучения	Коэффициент степени опасности ЛИ на границе ближней зоны							
	$R_{СОЛ1}$	$R_{СОЛ2}$	$R_{СОЛ3}$	$R_{СОЛ4}$	$R_{СОЛ w1}$	$R_{СОЛ w2}$	$R_{СОЛ w3}$	$R_{СОЛ w4}$
Непрерывное ЛИ, ИМ ЛИ	$8,7 P$	$4,4 P$	$6,2 P$	$2,5 P$	–	–	–	–
Импульсное ЛИ, ИМ ЛИ, при $\tau_{и} = 10^{-8}$ с, $\tau_{и} = 10^{-6}$ с	–	–	–	–	$1,1 \cdot 10^4 W_{и}$	$5,4 \cdot 10^3 W_{и}$	$2,2 \cdot 10^3 W_{и}$	$8,7 \cdot 10^2 W_{и}$
Импульсное ЛИ, ИМ ЛИ, при $\tau_{и} = 10^{-3}$ с	–	–	–	–	$1,4 \cdot 10^3 W_{и}$	$7,2 \cdot 10^2 W_{и}$	$2,9 \cdot 10^2 W_{и}$	$1,4 \cdot 10^2 W_{и}$

П р и м е ч а н и я

1 Значения $R_{СОЛ1}$ вычислены для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $R_{СОЛ2}$ – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм; $R_{СОЛ3}$ – для СПИ $750 < \lambda \leq 1000$ нм и $R_{СОЛ4}$ – для СПИ $1000 < \lambda \leq 1400$ нм.

2 Значения $R_{СОЛ1}$, $R_{СОЛ2}$ вычислены для $t_{в} = 0,25$ с; значения $R_{СОЛ3}$, $R_{СОЛ4}$ вычислены для $t_{в} = 10$ с.

3 Значения $R_{СОЛ w1}$ вычислены для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $R_{СОЛ w2}$ – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм;

$R_{СОЛ w3}$ – для СПИ $750 < \lambda \leq 1000$ нм и $R_{СОЛ w4}$ – для СПИ $1000 < \lambda \leq 1400$ нм.

4 P измеряется в милливаттах.

5 $W_{и}$ измеряется в миллиджоулях

Т а б л и ц а Е.3 – Значения расстояний до границ средней зоны лазерного пучка $Z_{СЗ}$, м

Диаметр пучка в плоскости выходного окна $d_{ли}$, мм	Угол расходимости Θ , рад				
	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
2	40,8	20,4	10,2	4,1	2,0
3	38,8	19,4	9,7	3,9	1,9
4	36,8	18,4	9,2	3,7	1,8
5	34,3	17,4	8,7	3,4	1,7

Т а б л и ц а Е.4 – Значения коэффициентов $k_{ЗРР}$, $k_{ЗРГ}$ и коэффициентов степени опасности излучения лазерного пучка $R_{СОЛ}$ в средней зоне при мощности излучения **1 мВт**

$Z, \text{ м}$	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
$d_{\text{П}}, \text{ мм}$	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$k_{ЗРР}$	1,00	0,77	0,60	0,49	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10
$k_{ЗРГ}$	0,87	0,78	0,70	0,62	0,56	0,49	0,44	0,39	0,35	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18
$R_{СОЛ1}$	8,7	7,8	7,0	6,2	5,6	4,9	4,4	3,9	3,5	3,2	2,9	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8
$R_{СОЛ2}$	4,4	3,9	3,5	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9
$R_{СОЛ3}$	6,2	5,5	5,0	4,4	4,0	3,5	3,1	2,8	2,5	2,3	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3
$R_{СОЛ4}$	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5

П р и м е ч а н и я

1 Значения $R_{СОЛ1}$, $R_{СОЛ2}$, $R_{СОЛ3}$, $R_{СОЛ4}$ вычислены для пучка основной ТЕМ₀₀ моды: $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад, $d_{\text{ЛЛ}} = 3$ мм.

2 Значения $R_{СОЛ1}$ вычислены для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $R_{СОЛ2}$ – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм; $R_{СОЛ3}$ – для СПИ $750 < \lambda \leq 1000$ нм и $R_{СОЛ4}$ – для СПИ $1000 < \lambda \leq 1400$ нм.

3 Значения $R_{СОЛ1}$, $R_{СОЛ2}$ вычислены для $t_{\text{В}} = 0,25$ с; значения $R_{СОЛ3}$, $R_{СОЛ4}$ вычислены для $t_{\text{В}} = 10$ с.

Т а б л и ц а Е.5 – Значения расстояний до границ лазерно опасных зон (ЛОЗ) $Z_{\text{ЛОЗ}}$ (м) и диаметров пучка лазерного излучения на границе ЛОЗ $d_{\text{ЛОЗ}}$ (м) для лазерного излучателя, работающего в видимой и ближней ИК областях спектра

$P, \text{ мВт}$	1	3	5	10	15	20	30	50	100	150	200	300	500
$Z_{\text{ЛОЗ}1}, \text{ м}$	57	102	134	192	236	274	337	437	620	761	879	1078	1394
$d_{\text{ЛОЗ}1}, \text{ мм}$	31	54	70	99	121	140	171	221	313	383	443	542	700
$Z_{\text{ЛОЗ}2}, \text{ м}$	38	71	93	134	165	192	236	307	437	536	620	761	984
$d_{\text{ЛОЗ}2}, \text{ мм}$	22	38	50	70	86	99	121	157	221	271	313	383	495
$Z_{\text{ЛОЗ}3}, \text{ м}$	47	86	112	161	199	231	284	368	523	642	742	911	1177
$d_{\text{ЛОЗ}3}, \text{ мм}$	26	46	59	84	102	118	145	187	265	324	374	458	592
$Z_{\text{ЛОЗ}4}, \text{ м}$	27	52	69	100	124	144	177	231	329	404	467	574	742
$d_{\text{ЛОЗ}4}, \text{ мм}$	17	29	37	53	65	75	92	118	167	205	237	290	374

П р и м е ч а н и я

1 Значения $Z_{\text{ЛОЗ}1}$, $Z_{\text{ЛОЗ}2}$, $Z_{\text{ЛОЗ}3}$, $Z_{\text{ЛОЗ}4}$, $d_{\text{ЛОЗ}1}$, $d_{\text{ЛОЗ}2}$, $d_{\text{ЛОЗ}3}$, $d_{\text{ЛОЗ}4}$ вычислены для пучка основной ТЕМ₀₀ моды: $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад, $d_{\text{ЛЛ}} = 3$ мм.

2 Значения $Z_{\text{ЛОЗ}1}$, $d_{\text{ЛОЗ}1}$ вычислены для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $Z_{\text{ЛОЗ}2}$, $d_{\text{ЛОЗ}2}$ – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм; $Z_{\text{ЛОЗ}3}$, $d_{\text{ЛОЗ}3}$ – для СПИ $750 < \lambda \leq 1000$ нм; $Z_{\text{ЛОЗ}4}$, $d_{\text{ЛОЗ}4}$ – для СПИ $1000 < \lambda \leq 1400$ нм.

3 Значения $Z_{\text{ЛОЗ}1}$, $Z_{\text{ЛОЗ}2}$, $d_{\text{ЛОЗ}1}$, $d_{\text{ЛОЗ}2}$ вычислены для $t_{\text{В}} = 0,25$ с; значения $Z_{\text{ЛОЗ}3}$, $Z_{\text{ЛОЗ}4}$, $d_{\text{ЛОЗ}3}$, $d_{\text{ЛОЗ}4}$ вычислены для $t_{\text{В}} = 10$ с.

Т а б л и ц а Е.6 – Значения коэффициентов степени опасности излучения лазерного пучка $R_{\text{СОЛ}}$ и диаметров пучка лазерного излучения $d_{\text{П}}$ в дальней зоне на расстоянии Z от выходного окна лазерного излучателя, работающего в видимой и ближней ИК областях спектра и имеющего мощность излучения $P = 100 \text{ мВт}$.

$Z, \text{ м}$	40	50	80	100	200	300	400	500	600	700	800
$d_{\text{П}}, \text{ мм}$	23	28	43	53	103	153	203	253	303	353	403
$R_{\text{СОЛ}1}$	169	118	52	34	9,2	4,2	2,4	1,5	1,1	0,8	0,6
$R_{\text{СОЛ}2}$	85	59	26	17	4,6	2,1	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3
$R_{\text{СОЛ}3}$	120	84	37	24	6,5	3,0	1,7	1,1	0,8	0,6	0,4
$R_{\text{СОЛ}4}$	50	35	15	10	2,7	1,2	0,7	0,4	0,3	0,2	0,2

П р и м е ч а н и я

1 Значения $R_{\text{СОЛ}1}$, $R_{\text{СОЛ}2}$, $R_{\text{СОЛ}3}$, $R_{\text{СОЛ}4}$ вычислены для пучка основной ТЕМ₀₀ моды: $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад, $d_{\text{ли}} = 3$ мм.

2 Значения $R_{\text{СОЛ}1}$ вычислены для СПИ $380 < \lambda \leq 600$ нм; $R_{\text{СОЛ}2}$ – для СПИ $600 < \lambda \leq 750$ нм; $R_{\text{СОЛ}3}$ – для СПИ $750 < \lambda \leq 1000$ нм; $R_{\text{СОЛ}4}$ – для СПИ $1000 < \lambda \leq 1400$ нм.

3 Значения $R_{\text{СОЛ}1}$, $R_{\text{СОЛ}2}$ вычислены для $t_{\text{В}} = 0,25$ с; значения $R_{\text{СОЛ}3}$, $R_{\text{СОЛ}4}$ вычислены для $t_{\text{В}} = 10$ с.

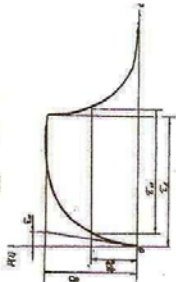
Т а б л и ц а Е.7 – Значения коэффициентов пересчета K_{WP} по СОЛ и коэффициентов пересчета $K_{\text{WP ЛОЗ}}$ по ЛОЗ

СПИ, нм	Обозначение K_{WP} , $K_{\text{WP ЛОЗ}}$	Значения K_{WP} , $K_{\text{WP ЛОЗ}}$ при $\tau_{\text{И}} = 10^{-8}$ с и $\tau_{\text{И}} = 10^{-6}$ с	Значения K_{WP} , $K_{\text{WP ЛОЗ}}$ при $\tau_{\text{И}} = 10^{-3}$ с
$380 < \lambda \leq 600$	$K_{\text{WP}1}$	1160	155
	$K_{\text{WP ЛОЗ}1}$	34	14,5
$600 < \lambda \leq 750$	$K_{\text{WP}2}$	1200	158
	$K_{\text{WP ЛОЗ}2}$	35	13
$750 < \lambda \leq 1000$	$K_{\text{WP}3}$	350	47
	$K_{\text{WP ЛОЗ}3}$	19	7
$1000 < \lambda \leq 1400$	$K_{\text{WP}4}$	350	47
	$K_{\text{WP ЛОЗ}4}$	19	7

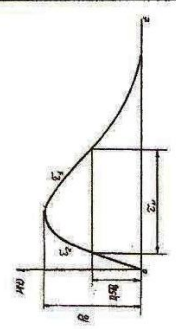
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Функции, описывающие формы импульсов и погрешность интегрирования

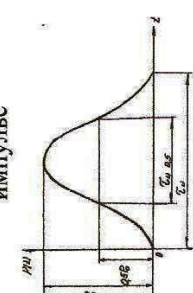
Т а б л и ц а Ж.1. Функции, описывающие формы импульса лазерного излучения, импульса на выходе интегратора и погрешность интегрирования

Название импульса, форма импульса	Функция $P(t)$	Функция $U_{\text{инт}}(p), U_{\text{инт}}(t)$	δ _{инт} , %
Импульс с экспоненциальными фронтами 	$P(t) = \begin{cases} P_0 \left(1 - e^{-t/\tau_n} \right) & \text{при } t \leq \tau_n \\ P_0 \left(e^{-t/\tau_n} - 1 \right) e^{-t/\tau_1} & \text{при } t > \tau_1 \end{cases}$	$U_{\text{инт}}(p) = S_{\text{тип}} P_0 \frac{abc}{p(p+a)(p+b)(p+c)}$ $U_{\text{инт}}(t) = S_{\text{тип}} P_0 abc \times \left[\frac{e^{-at} (e^{ct} - 1)}{a(a-b)(a-c)} + \frac{e^{-bt} (e^{ct} - 1)}{b(b-a)(b-c)} + \frac{e^{-ct} (e^{ct} - 1)}{c(c-a)(c-b)} \right],$ <p>где $a = 1/\tau_n,$ $b = 1/\tau_{\text{тип}},$ $c = 1/\tau_1.$</p>	$\delta_{\text{инт}} = 100 \times \left\{ 1 - \left(\frac{\eta - \eta\gamma}{e^{\eta} - 1} \right)^{\frac{\eta}{n-2}} \left[\frac{e^{\eta} - 1}{\eta(1-\gamma)} \right]^{\frac{\eta}{n-2}} \right\},$ <p>где $n = \tau_1/\tau_n, \eta = \tau_1/\tau_{\text{тип}},$ $\gamma = \tau_{\text{тип}}/\tau_{\text{инт}}.$</p> <p>Для $\delta_{\text{инт}} = 2\%$ при $n = 5,$ $\gamma = 4 \cdot 10^{-5}$ нужно $\eta = 0,015$ (при $\tau_{\text{н макс}} = 10^{-2}$ с нужно $\tau_{\text{инт}} = 6,3 \cdot 10^{-1}$ с).</p>

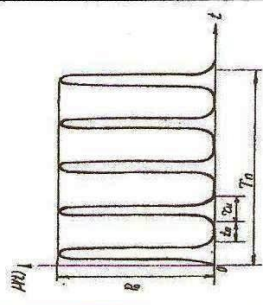
Продолжение таблицы Ж.1

<p>Двухэкспоненциальный Импульс</p> 	$P(t) = P_0 \frac{\beta}{\beta - \alpha} \left(\frac{\beta}{\beta - \alpha} e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} \right),$ <p>где $\alpha = 1/\tau_1$, $\beta = 1/\tau_2$</p>	$S_{\text{плп}} P_0 \beta \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{\alpha} \frac{\alpha}{\beta - \alpha} \frac{bc}{(p + \alpha)(p + \beta)(p + b)(p + c)},$ <p>где $b = 1/\tau_{\text{инт}}$, $c = 1/\tau_{\text{плп}}$.</p> $U_{\text{инт}}(t) = S_{\text{плп}} P_0 M \times \left[A e^{-\eta t} + B e^{-\gamma q(n)t} + C e^{-\frac{\eta q(n)}{q(n)} - \alpha t} \right],$ <p>где $M = \frac{\eta^2 n^{n-1}}{(n-1)(q(n) - \eta)(\eta - q(n))}$, $A = \frac{\eta - q(n)\gamma}{[nq(n) - \eta][\eta - q(n)]}$, $B = \frac{\gamma^2 q(n)(n-1)(\eta - q(n))}{\eta(\eta - nq(n))\gamma(1 - \gamma)}$, $C = \frac{(n-1)q(n)(\eta - q(n))\gamma}{(\gamma - 1)\eta(\eta - nq(n))}$, $n = \tau_1/\tau_2$, $\eta = \tau_{\text{плп}}/\tau_{\text{инт}}$, $\gamma = \tau_{\text{плп}}/\tau_{\text{инт}}$</p>	$\delta_{\text{инт}} = 100 \times \left\{ 1 - \frac{[nq(n) - \eta]q(n) - \eta}{[nq(n) - \eta]q(n) - \eta} \right\},$ <p>где $n = \tau_1/\tau_2$, $\eta = \tau_{\text{плп}}/\tau_{\text{инт}}$.</p> <p>Для $\delta_{\text{инт}} = 2\%$ при $n = 5$ нужно $\eta = 4,5 \cdot 10^{-3}$ (при $\tau_{\text{плп max}} = 10^{-2}$ с нужно $\tau_{\text{инт}} = 2,2$ с).</p>
---	--	---	---

Продолжение таблицы Ж.1

<p>Колоколообразный импульс</p> 	$P(t) = \begin{cases} \frac{P_0}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{\tau_{И}} t \right) & \text{при } t \leq \tau_{И} \\ 0 & \text{при } t > \tau_{И} \end{cases}$	$U_{\text{ИИТ}}(P) = S_{\text{ПИП}} P_0 \frac{a^2 bc}{2p(p^2 + a^2)(p+b)(p+c)}$ <p>где $a = 2\pi/\tau_{И}$, $b = 1/\tau_{\text{ИИТ}}$, $c = 1/\tau_{\text{ПИП}}$.</p> <p>Для $t < \tau_{И}$</p> $U_{\text{ИИТ}}(t) = 0,5 S_{\text{ПИП}} P_0 \times \left\{ 1 - \frac{uc}{(a^2 + u^2)(a^2 + c^2)} [(bc - a^2) \cos at + a(b+c) \sin at] + \frac{a^2 c e^{-bt}}{(a^2 + b^2)(b-c)} - \frac{a^2 b e^{-ct}}{(a^2 + c^2)(b-c)} \right\}$ <p>Для $t \geq \tau_{И}$</p> $U_{\text{ИИТ}}(t) = \left[\frac{S_{\text{ПИП}} P_0 a^2}{2(b-c)} \left(\frac{e^{ct} - 1}{a^2 + c^2} e^{-ct} - \frac{c \left(e^{\frac{bt}{\tau_{И}} - 1}} - 1 \right)}{a^2 + b^2} e^{-bt} \right) \right]$	$\delta_{\text{ИИТ}}^{(1)} = 100 \times \left\{ 1 - \eta^{-1} \left[1 - [(\eta^2 - 4\pi^2 \gamma) \times \cos 2\pi(t_{\text{max}}/\tau_{И}) + \sin 2\pi(t_{\text{max}}/\tau_{И}) \times 4\pi^2 e^{-\eta t_{\text{max}}/\tau_{И}}] \right] \right\}$ <p>где $\eta = \tau_{И}/\tau_{\text{ИИТ}}$, $t_{\text{max}} = \tau_{\text{ПИП}} \ln \eta^{-1}$, $\gamma = \tau_{\text{ПИП}}/\tau_{\text{ИИТ}}$.</p> <p>Для $\delta_{\text{ИИТ}} = 2\%$ нужно $\eta = 0,04$ (при $\tau_{И \text{max}} = 10^{-2}$ с нужно $\tau_{\text{ИИТ}} = c$).</p>
---	--	--	---

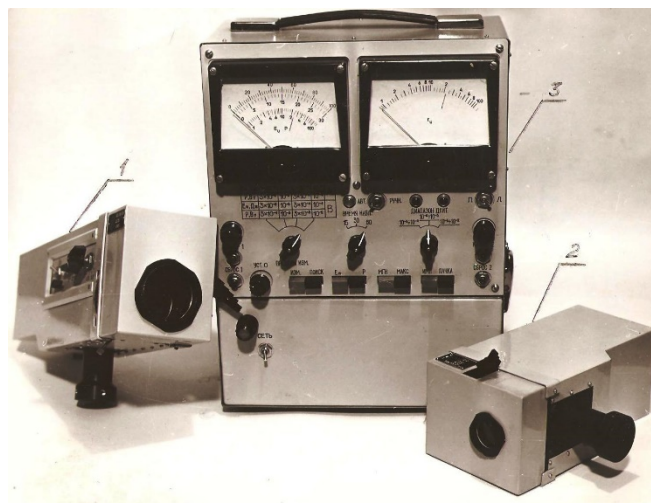
Продолжение таблицы Ж.1

<p>Серия импульсов колоколообразной формы</p> 	$P(t) = \begin{cases} \frac{P_0}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T_n} t \right) & \text{при } (n-1)(\tau_n + t_n) \leq t \leq [n\tau_n + (n-1)T_n] \\ 0 & \text{при } n[\tau_n + (n-1)T_n] < t < (n+1)(\tau_n + t_n) \end{cases}$ <p>где $n = 1, 2, 3, \dots, N$, N – количество импульсов в серии.</p>	$U_{\text{инт}}(t) = 0,5 S_{\text{ПМП}} P_0 a^2 (b-c)^{-1} \times$ $\times \left[\frac{b(e^{c\tau_n} - 1)}{a^2 + c^2} e^{-ct} \sum_{n=1}^N e^{c(n-1)(\tau_n + t_n)} - \frac{c(e^{b\tau_n} - 1)}{a^2 + b^2} e^{-bt} \sum_{n=1}^N e^{b(n-1)(\tau_n + t_n)} \right]$	$\delta_{\text{инт}}^{(2)} = 100 \times \left\{ 1 - \left[\eta_{\text{П}} + \eta(\theta - 1) \right]^{-1} \left\{ 1 - e^{-\left[\eta_{\text{П}} + \eta(\theta - 1) \right]} \right\} \right\}$ <p>где $\eta = \tau_n / \tau_{\text{инт}}$, $\eta_{\text{П}} = T_{\text{П}} / \tau_{\text{инт}}$</p>
<p>1) Погрешность интегрирования для колоколообразного импульса меньше погрешности интегрирования для прямоугольного импульса.</p>		<p>2) Погрешность преобразования серии коротких импульсов излучения при достаточно большой частоте повторения импульсов в серии (что характерно для режима свободной генерации) практически не отличается от погрешности преобразования импульса излучения прямоугольной формы с длительностью равной длительности серии.</p>	

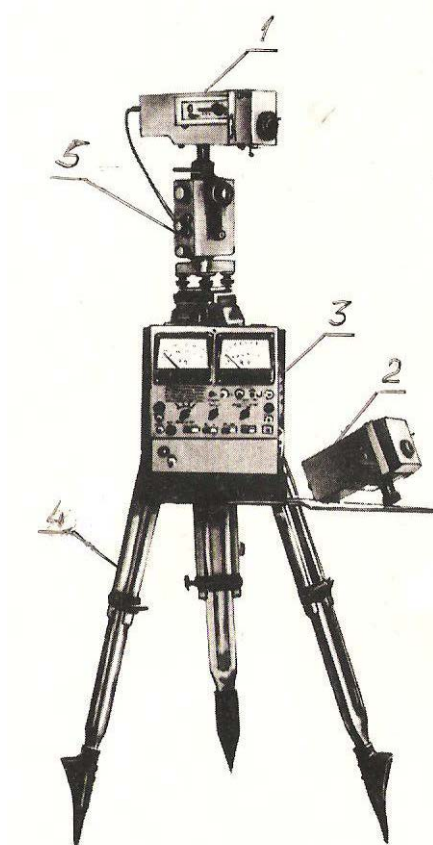
ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Дозиметры лазерного излучения

3.1 Измерители для лазерной дозиметрии ИЛД-2, ИЛД-2М



а



б

Рисунок 3.1 – Измеритель для лазерной дозиметрии ИЛД-2: а – фотоприемные устройства: ФПУ-А (1), ФПУ-Б (2), блок преобразования и регистрации БПР (3); б – ИЛД-2М в рабочем положении: 1 – ФПУ-А, 2 – ФПУ-Б, 3 – БПР, 4 – штатив, 5 – теодолит Т-15



а



б

Рисунок 3.2 – Измеритель для лазерной дозиметрии ИЛД-2М: а – фотоприемное устройство ФПУ (1); блок преобразования и регистрации БПР (2), б – ИЛД-2М в рабочем положении: 1 – ФПУ, 2 – БПР, 3 – штатив, 4 – теодолит Т-30

Т а б л и ц а 3.1 – Технические характеристики лазерного дозиметра ИЛД-2М

Техническая характеристика	Спектральный диапазон 0,49 – 1,15 мкм	Спектральный диапазон 2 – 11 мкм
Рабочая длина волны, мкм	0,53; 0,63; 0,69; 1,06	10,6
Диапазон измерений энергии импульсов лазерного излучения, Дж	$10^{-8} - 1$	$10^{-6} - 10^{-2}$
Диапазон измерений импульсной энергетической экспозиции, Дж·см ²	$1,4 \cdot 10^{-9} - 1$	$10^{-5} - 10^{-1}$
Диапазон измерений средней мощности непрерывного лазерного излучения, Вт	$10^{-6} - 10$	$10^{-4} - 1$
Диапазон измерений облученности от непрерывного лазерного излучения, Вт·см ⁻²	$1,4 \cdot 10^{-7} - 10$	$10^{-3} - 1$
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении энергетических параметров лазерного излучения, %	±18	±20
Диапазон длительностей импульсов лазерного излучения при измерении энергии (энергетической экспозиции), с	$10^{-8} - 10^{-2}$	$10^{-6} - 10^{-2}$
Максимальное значение частоты повторения импульсов с ⁻¹	200	25
Диапазон измерений длительности импульсов лазерного излучения, с	$10^{-6} - 10^{-2}$	–
Диапазон значений диаметров пучков лазерного излучения при измерении энергии (средней мощности), мм	2 – 30	2 – 4
Площадь входного зрачка фотоприемного устройства, см ²	7,1	1,1
Угол поля зрения фотоприемного устройства, угл. град.	5; 15	3

3.2 Многоцелевые лазерные дозиметры ЛДМ-1, ЛДМ-2



Рисунок 3.3 – Многоцелевой лазерный дозиметр ЛДМ-1: 1 – ФПУ-1; 2 – ФПУ-2; 3 – БПР; 4, 5 – сменные ослабители излучения; 6 – защитные очки; 7 – устройство для крепления ФПУ-1 или ФПУ-2 на голове оператора

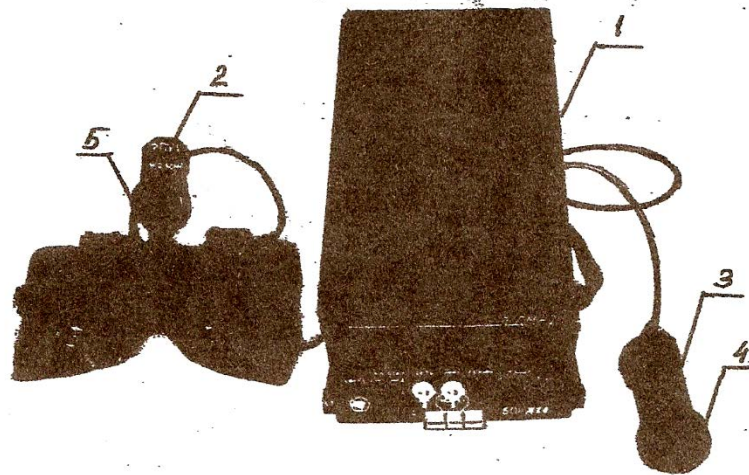


Рисунок 3.4 – Многоцелевой лазерный дозиметр ЛДМ-2: 1 – БПР; 2 – ФПУ-1; 3 – ФПУ-2; 4, 5 – сменные ослабители излучения

Т а б л и ц а 3.2 – Технические характеристики лазерного дозиметра ЛДМ-2

Техническая характеристика	Спектральный диапазон 0,49 – 1,15 мкм	Спектральный диапазон 2 – 11 мкм
Рабочая длина волны излучения, мкм	0,53; 0,63; 0,69; 0,91; 1,06	10,6
Диапазон измерений импульсной энергетической экспозиции, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁹ – 10 ⁻¹	10 ⁻⁵ – 10 ⁻¹
Диапазон измерений облученности от непрерывного лазерного излучения, Вт·см ⁻²	10 ⁻⁷ – 10	10 ⁻³ – 1
Диапазон измерений суммарной энергетической экспозиции от импульсного или непрерывного лазерного излучения, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁷ – 10 ³	10 ⁻⁵ – 10 ⁻¹
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении энергетических параметров лазерного излучения, %	±20	±25
Диапазон длительностей импульсов лазерного излучения при измерении энергетической экспозиции, с	10 ⁻⁸ – 10 ⁻²	10 ⁻⁶ – 10 ⁻²
Максимальное значение частоты повторения импульсов с ⁻¹	500	25
Площадь входного зрачка фотоприемного устройства, см ²	0,5	0,2
Угол поля зрения фотоприемного устройства, угл. град.	20	3
Значения ПДУ лазерного излучения, превышение которых регистрируется подачей звукового сигнала при измерении импульсной энергетической экспозиции, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁸ ; 2·10 ⁻⁸ ; 4·10 ⁻⁸ ; 8·10 ⁻⁸ ; 10 ⁻⁷	–
Значения ПДУ лазерного излучения, превышение которых регистрируется подачей звукового сигнала при измерении суммарной энергетической экспозиции, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁶ ; 2·10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴ ; 10 ⁻³ ; 10 ⁻²	–

3.3 Многоцелевой лазерный дозиметр ЛАДИН

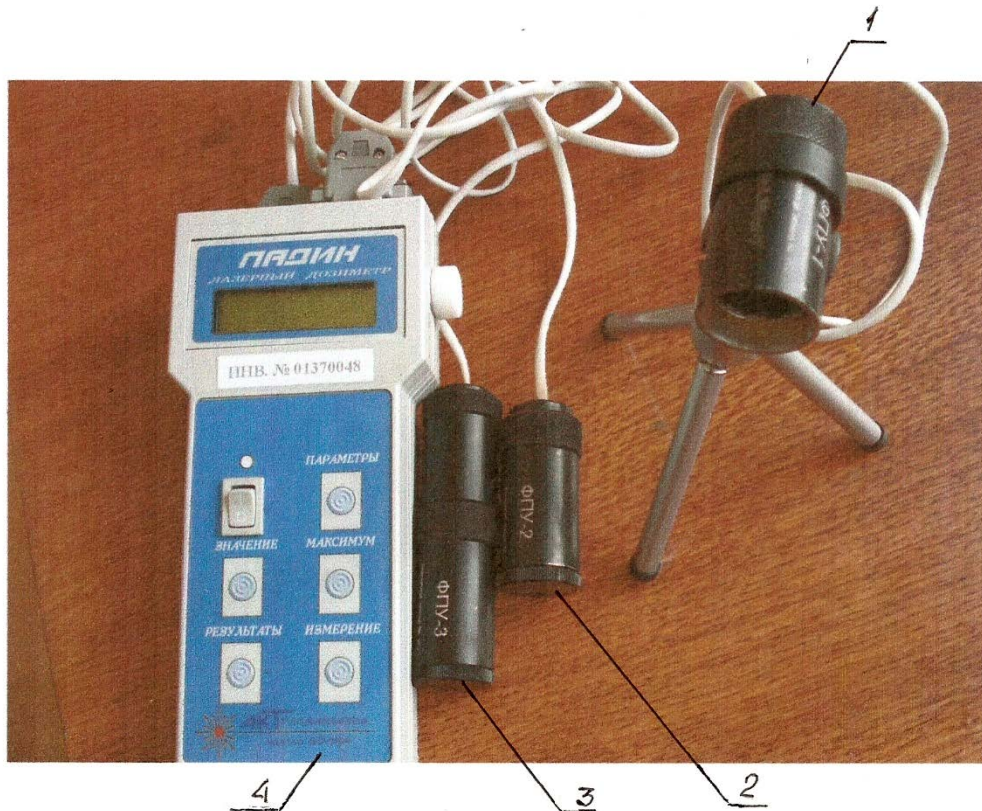


Рисунок 3.5 – Лазерный дозиметр ЛАДИН: 1 – ФПУ-1; 2 – ФПУ-2; 3 – ФПУ-3; 4 – БПР

Т а б л и ц а 3.3 – Технические характеристики многоцелевого лазерного дозиметра ЛАДИН

Техническая характеристика	Спектральный диапазон 0,49 – 1,15 мкм	Спектральный Диапазон 1,15 –1,8 мкм	Спектральный диапазон 2–11 мкм
Рабочая длина волны излучения, мкм	0,48; 0,53; 0,63; 0,67; 0,78; 0,85; 0,92; 0,98; 1,06	1,15; 1,30; 1,54	10,6
Диапазон измерений импульсной энергетической экспозиции, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ – 10 ⁻⁴	10 ⁻⁵ – 10 ⁻¹
Диапазон измерений облученности от непрерывного лазерного излучения, Вт·см ⁻²	10 ⁻⁶ – 10 ⁻²	10 ⁻⁵ – 10 ⁻¹	10 ⁻³ – 1
Диапазон измерений суммарной энергетической экспозиции от импульсного или непрерывного лазерного излучения, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁷ – 10 ²	10 ⁻⁷ – 10 ²	10 ⁻⁴ – 10 ⁴
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении энергетических параметров лазерного излучения, %	±20	±20	±25

Продолжение таблицы 3.3

Диапазон длительностей импульсов лазерного излучения при измерении энергетической экспозиции, с	$10^{-8} - 10^{-2}$	$10^{-8} - 10^{-2}$	$10^{-6} - 10^{-2}$
Максимальное значение частоты повторения импульсов с ⁻¹	200	25	25
Угол поля зрения фотоприемного устройства, угл. град.	20	20	3

3.4 Лазерные дозиметры ЛД-4, ЛД-4Э



Рисунок 3.6 – Лазерный дозиметр ЛД-4 в рабочем положении для проведения предупредительного дозиметрического контроля

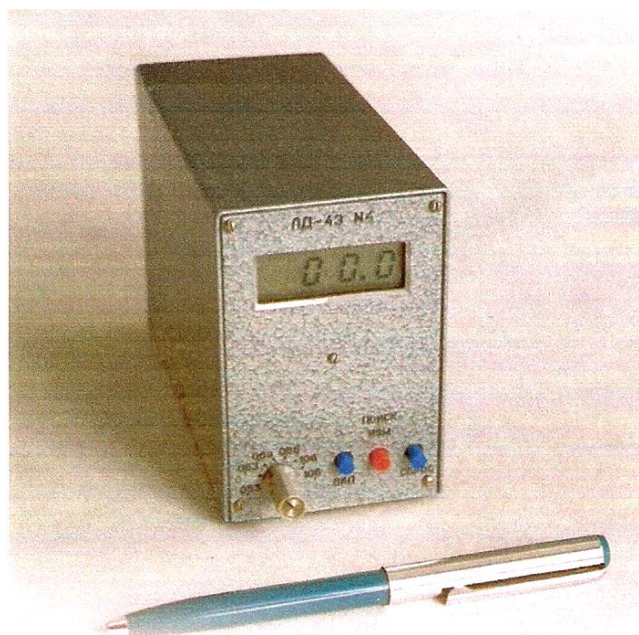


Рисунок 3.7 – Лазерный дозиметр ЛД-4Э

Т а б л и ц а 3.4 – Технические характеристики лазерных дозиметров ЛД-4 и ЛД-4Э

Техническая характеристика	Спектральный диапазон 0,49 – 1,15 мкм	Спектральный диапазон 2 – 11 мкм
Рабочая длина волны излучения, мкм	0,53; 0,63; 0,69; 0,89; 1,06	10,6
Диапазон измерений импульсной энергетической экспозиции, Дж·см ⁻²	10 ⁻⁸ – 2·10 ⁻⁶ (ЛД-4) 10 ⁻⁸ – 2·10 ⁻⁵ (ЛД-4Э)	10 ⁻⁶ – 2·10 ⁻⁴ (ЛД-4)
Диапазон измерений облученности от непрерывного лазерного излучения, Вт·см ⁻²	10 ⁻⁶ – 2·10 ⁻⁴ (ЛД-4) 10 ⁻⁶ – 2·10 ⁻³ (ЛД-4Э)	10 ⁻⁴ – 2·10 ⁻² (ЛД-4)
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении импульсной энергетической экспозиции, %	± 16 (ЛД-4) ± 8 (ЛД-4Э)	±25 (ЛД-4)
Пределы допускаемой основной относительной погрешности при измерении облученности от непрерывного лазерного излучения, %	± 14 (ЛД-4) ± 6 (ЛД-4Э)	±20 (ЛД-4)
Диапазон длительностей импульсов лазерного излучения при измерении энергетической экспозиции, с	10 ⁻⁸ – 5·10 ⁻³	10 ⁻⁶ – 5·10 ⁻³
Максимальное значение частоты повторения импульсов с ⁻¹	200; 15 (ЛД-4)* 15 (ЛД-4Э)	15
Площадь входного зрачка фотоприемного устройства, см ²	0,38	1,12
Угол поля зрения фотоприемного устройства, угл. град.	15	3
* По согласованию с заказчиком дозиметр ЛД-4 выпускается в расчете на максимальную частоту повторения импульсов либо 200 Гц (в схему вводится блок СФС), либо 15 Гц (в схему блок СФС не вводится).		