

На правах рукописи



Кибовский Владимир Титанович

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

Специальность

05.26.01 – Охрана труда (транспорт)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» (РУТ (МИИТ))

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Рахманов Борис Николаевич

Официальные оппоненты:

Тихомиров Сергей Владимирович – доктор технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ»), ведущий научный сотрудник лаборатории метрологии малоинтенсивного лазерного излучения и волоконно-оптических систем;

Бутримова Елена Владимировна – кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет (СТАНКИН)» (МГТУ «СТАНКИН»), доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность».

Ведущая организация – федеральное бюджетное учреждение науки «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» (ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья»).

Защита состоится 28 февраля 2018 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) www.miit.ru

Автореферат разослан « »

2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Плицына Ольга Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия лазеры широко используются в различных сферах деятельности человека. Лазерное излучение (ЛИ) официально отнесено к группе опасных и вредных физических факторов воздействия. Любые лазерные изделия (ЛИЗ) представляют собой продукцию повышенной опасности, связанной, прежде всего, со способностью ЛИ, генерируемого в спектральном диапазоне от 380 до 1400 нм, нанести 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 современном транспортном машиностроении (судостроение, автомобилестроение, локомотивостроение и вагоностроение) широко используются лазерные технологические установки (ЛТУ), предназначенные для мощного лучевого воздействия на различные материалы с целью их резки, сварки, обработки поверхности. Из-за больших габаритов объектов воздействия (например, металлические листы обшивки морских судов) далеко не всегда удастся оградить зону воздействия ЛИ на материалы с помощью защитных экранов и кабин. Отраженное от поверхности объекта воздействия ЛИ распространяется в окружающем пространстве и представляет опасность для персонала. Мощность излучения ЛТУ в последние годы достигла десятков киловатт, поэтому все более актуальным становится инструментальный контроль уровней отраженного ЛИ на рабочих местах (РМ) операторов ЛТУ открытого типа.

Лазеры широко применяются на открытых пространствах (ОПР), характеризующихся длинами трасс распространения лазерных пучков от нескольких десятков метров до десятков километров. ЛИЗ, работающие на ОПР, применяются в транспортной отрасли: лазерные системы навигации, обеспечивающие безопасность проводки морских и речных судов и безопасность посадки воздушных судов (ВС), лазерные измерители скорости (ЛИС) автотранспорта. В последние годы в свободной продаже появились ЛИЗ гражданского назначения, работающие на ОПР, и представляющие опасность для водителей наземных транспортных средств (ТС) и пилотов ВС: мощные лазерные указки (ЛУК), лазерные прицелы-целеуказатели (ЛПР) для спортивного и охотничьего оружия, лазерные дальномеры-рулетки (ЛДР). Актуальной становится задача контроля безопасности ЛИЗ, работающих на ОПР. Наиболее эффективным средством контроля безопасности ЛИЗ, работающих на ОПР, 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).

Особое опасение вызывает бесконтрольное распространение ЛУК, мощность излучения которых за несколько лет возросла более чем в 10 тысяч раз: от милливатт до десятков ватт! Отсутствие государственного контроля продаж мощных ЛУК приводит к наблюдающимся уже несколько лет фактам т.н. «лазерного хулиганства», при котором лазерным пучком облучаются пилоты ВС и водители ТС. С апреля 2017 г. это действие является уголовным преступлением, предусмотренным статьей 267.1 УК РФ «Действия, угрожающие безопасной эксплуатации транспортных средств». Для выявления наличия состава преступления, предусмотренного ст. 267.1, актуальной становится разработка методов экспертной оценки степени угрозы безопасной эксплуатации ТС (ВС) при несанкционированном воздействии на них излучением лазерных изделий.

Безопасность ЛИЗ регулируется в РФ с помощью «Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров» № 5804 – 91 (далее СН 5804, СН). В 2017 г. введены в действие СанПин 2.2.4.3359 – 16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» (далее СанПин). В разделе СанПин «VIII. Лазерное излучение на рабочих местах» установлены гигиенические нормативы ЛИ (предельно допустимые уровни, ПДУ) идентичные ПДУ по СН 5804.

За рубежом действует серия стандартов Международной Электротехнической Комиссии (МЭК, IEC), возглавляемая стандартом IEC 60825-1 «Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements» (далее IEC-1). Основным инструментом обеспечения безопасности 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. Однако классификация ЛИЗ не является достаточно эффективным средством оценки безопасности людей, попадающих в зону действия ЛИ. Классификация ЛИЗ дает лишь качественную оценку потенциальной 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 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 методике классификации

ЛИЗ. Эта разработка становится еще более актуальной в связи с тем, что на территории РФ был введен ГОСТ ИЕС 60825-1 – 2013 (далее ГОСТ ИЕС-1) идентичный стандарту ИЕС-1, значительно занижающий степень опасности ЛИ 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.

Существует математический аппарат классической теоретической фотометрии,^{1,2} 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 работе Рахманова Б. Н.³ рассматривались методы расчета энергетических характеристик в полях диффузно отраженного лазерного излучения с целью оценки его безопасности. Однако в этой работе 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.⁴ 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

¹ Р. А. Сапожников. Теоретическая фотометрия. М., 1967. 268 с.

² М. М. Гуревич. Фотометрия (теория, методы и приборы). Л., 1983. 272 с.

³ Рахманов Б. Н. Лазеры. Защита и профилактика от их неблагоприятного воздействия. Часть 2 // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. 2004. № 6.

⁴ Б. Я. Бурдаев и др. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения. М., 1981. 288 с.

транспортной отрасли, 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 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 (далее «Методика СОУТ»).

3. Разработать расчетные методы оценки СОЛ и СОСЛ ЛП.

4. Разработать средства инструментального контроля безопасности ЛИ (лазерные дозиметры), методы их поверки и методику дозиметрического контроля ЛИ на РМ.

Научная новизна работы

1. 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. Предложена обобщенная методика СОУТ на РМ при воздействии ЛИ на основе применения результатов измерений или вычислений максимальных значений КСОЛ на РМ с использованием ПДУ по СН и применения классификации условий труда при воздействии ЛИ в соответствии с «Методикой СОУТ».

3. Разработаны расчетные методы оценки СОЛ 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 TEM_{00} 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»; ЛПР: «ЛЦУ-ОМ-1L», «EL 888077», «Yukon Sight Mark»; ЛДР: «Leica Disto A5», «Stabila LE 20», «Agatec DM100».

4. Разработаны методы оценки степени ослепления лазерным пучком, основанные на новом 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 ВС, совершающих взлет или 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 диапазоне измеряемых энергетических параметров при широком диапазоне длительностей и частот повторения импульсов ЛИ. Схемотехнические решения выполнены на уровне изобретений, защищенных авторскими свидетельствами и патентом.⁵ Разработаны методы поверки лазерных дозиметров и соответствующая поверочная установка, обеспечившие единство измерений в области лазерной дозиметрии.

6. Разработаны единые методики дозиметрического контроля ЛИ на рабочих местах, 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».

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 и провести организационно-технические мероприятия по контролю использования в этих зонах ЛИЗ, угрожающих

⁵ Авт. св. №533832. В. Т. Кибовский. Устройство для измерения энергетических параметров световых импульсов.

Авт. св. №1141846 В. Т. Кибовский и др. Лазерный дозиметр.

Авт. св. №1571813 В. Т. Кибовский и др. Многоцелевой лазерный дозиметр.

Патент SU 1817836 А. В. Т. Кибовский и др. Устройство оперативного дозиметрического контроля лазерного излучения опасного для глаз человека.

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 широко используются органами Роспотребнадзора для инструментального контроля условий труда на различных предприятиях, использующих лазерные технологии. Создана универсальная поверочная установка для поверки ЛД. Методы поверки регламентированы в нормативном документе Р 50.2.025 – 2002 «ГСИ. Рекомендации по метрологии. Дозиметры лазерные. Методика поверки».

Методология и методы исследования

В работе используются методы расчета энергетических и пространственных параметров лазерных пучков⁶ с целью СОУТ, а также методы расчета параметров электронных цепей с применением операционного исчисления⁷ для разработки схемотехнических решений средств инструментального контроля лазерной безопасности.

Положения, выносимые на защиту

1. Значения ПДУ по стандарту МЭК (ГОСТ IEC-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 IEC-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;⁸ б) разработка нового национального стандарта по ЛБ, гармонизированного с СН 5804 в части ПДУ.⁹

2. Методика специальной оценки условий труда людей, связанных с транспортной отраслью, в условиях воздействия ЛИ. СОУТ проводится путем применения результатов вычислений и (или) измерений максимальных значений коэффициентов степени опасности ЛИ на РМ с использованием ПДУ по СН и классов (подклассов) условий труда

⁶ Ю. М. Климков. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М., 1978.

⁷ Л. Н. Тошаков. Передача сигналов по линейным электрическим цепям Л., 1973.

⁸ Предложение реализовано. В СанПин 2.2.4.3359 регламентированы ПДУ идентичные ПДУ по СН 5804.

⁹ Предложение опубликовано. Б.Н.Рахманов, В.А.Девисилов, А.В.Митрофанов, В.Т.Кибовский. Фотоника. 2014. № 1/43. С. 28 – 37.

по Приложению 18 к «Методике СОУТ» с помощью предлагаемой 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. Использование этих формул позволяет учесть наиболее опасные условия острой фокусировки в лазерном пучке при разработке гигиенических нормативов ЛИ.

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-1Л», «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: 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 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» (Москва. 1976, 1979, 2008); «Применение лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике» (Москва. 1979);

«Применение лазеров в науке и технике» (Ленинград, 1980); «Гигиенические аспекты использования лазерного излучения в народном хозяйстве» (Москва, 1982) а также на 6-ом Всесоюзном семинаре «Импульсная фотометрия» (Москва, 1978).

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.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 печатных работ, 15 из которых – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; получены 1 патент и 4 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х 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 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется основная цель работы и устанавливаются основные задачи исследований. Приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы по вопросам биологического действия ЛИ (БД ЛИ) и гигиенического нормирования ЛИ. Основное внимание уделено БД ЛИ на глаз человека, являющийся наиболее уязвимым органом для ЛИ. ЛИ с длинами волн от 400 до 1400 нм фокусируется на сетчатку, при этом коэффициент оптического усиления по плотности мощности или энергии примерно равен 10^5 . Например, при значении облученности роговицы глаза 10^{-3} Вт·см⁻² значение облученности сетчатки составляет 100 Вт·см⁻². На рисунке 1 представлена совокупная кривая пропускания оптических сред глаза с учетом поглощения в сетчатке для светового излучения различных длин волн. Видно, что в диапазоне λ от 400 до 1400 нм излучение хорошо пропускается оптикой глаза. Излучение с длиной волны $\lambda = 532$ нм поглощается сетчаткой в максимальной степени, т.е. наибольшую опасность для сетчатки представляет «зеленое» ЛИ, генерируемое широко распространенными лазерными указками.

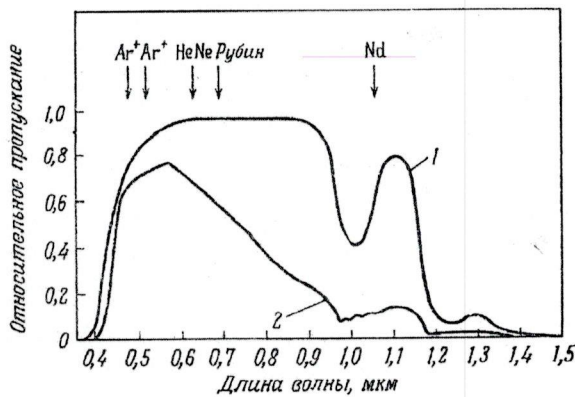


Рисунок 1 – Кривые пропускания светового излучения средами глаза: 1 – кривая пропускания оптической системы глаза; 2 – совокупная кривая пропускания с учетом поглощения в сетчатке (Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974)

Рассмотрены вопросы различия между отечественными и зарубежными нормами ЛБ. Проведено сравнение ПДУ по СН 5804 и по ИЕС-1 (ГОСТ ИЕС-1). Установлено, что значения $P_{\text{ПДУ}}$ (Вт), регламентированные в СН для наиболее опасных для глаз $\lambda = 445$ нм и $\lambda = 532$ нм, на порядок меньше значений $P_{\text{МРЕ}}$ (Вт), установленных в ИЕС-1 (см. таблицу 1; коэффициент несоответствия $k_{\text{МРЕ/ПДУ}} = P_{\text{МРЕ}}/P_{\text{ПДУ}} = 10$). Основной вывод. Введение в действие ГОСТ ИЕС 60825-1 не

соответствует Федеральным законам «О стандартизации в Российской Федерации» от 29.06.2015 г. № 162-ФЗ и «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ, а также «Положению о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании» от 24.06.2000 г. № 554, поскольку этот стандарт значительно понижает уровень безопасности лазерной продукции по сравнению с уровнями, установленными в СН и СанПин.

Т а б л и ц а 1 – Значения ПДУ и МРЕ при воздействии на глаза непрерывного лазерного излучения для длин волн 445, 532, 635, 905 нм

λ , нм	СН 5804 – 91	ИЕС 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; $P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} t^{-1}$ 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 ; $P_{\text{МРЕ}} = W_{\text{МРЕ}} t^{-1}$ 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; $P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}} t^{-1}$ 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 ; $P_{\text{МРЕ}} = W_{\text{МРЕ}} t^{-1}$ 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	$E_{\text{МРЕ}} = 10 C_4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} = 28,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, $C_4 = 10^{0,002 (\lambda - 700)} = 2,82$; $P_{\text{МРЕ}} = E_{\text{МРЕ}} \cdot S_{\text{ЗР}}^{-1}$ Вт = $1,1 \cdot 10^{-3}$ Вт = 1,1 мВт	7,9

В связи с этим, необходимо разработать и ввести в действие на территории РФ новый стандарт по ЛБ, гармонизированный с СН и СанПин.

Во второй главе предложена общая модель оценки СОЛ источников с различными видами оптических полей: направленный лазерный пучок, диффузно отраженное излучение, близко расположенный или удаленный от объекта воздействия источник (рисунок 2). Введено понятие «коэффициент степени опасности лазерного излучения, КСОЛ» – коэффициент, показывающий степень превышения уровня энергетической

экспозиции (облученности) элементарного участка поверхности, на котором расположена заданная точка пространства, над ПДУ энергетической экспозиции (облученности). С учетом общепринятого в технике безопасности принципа учета наихудшего действия воздействующего фактора (принципа учета наибольшего риска) предложена следующая общая формула определения КСОЛ ($R_{\text{СОЛ}}$)

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

где $H_A(X_A, Y_A, Z_A, T_K)$ ($\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$) – энергетическая экспозиция элемента dS_A , окружающего точку контроля А (рисунок 2) с пространственными координатами X_A, Y_A, Z_A , определенная за время контроля T_K ;

$H_{\text{ПДУ}}(t_B, \lambda, \alpha_{LS})$ ($\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$) – 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;

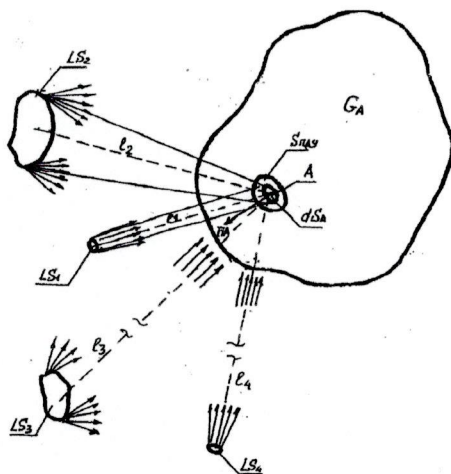


Рисунок 2 – Общая схема взаимодействия полей излучения различных лазерных источников с участком поверхности dS_A тела человека: $LS_1 - LS_4$ – источники лазерного излучения

$S_{\text{ПДУ}} (\text{м}^2)$ – площадь участка поверхности тела человека, значение которой регламентировано в соответствии с СН: $S_{\text{ПДУ}} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ для роговицы глаза в спектральном диапазоне 380 – 1400 нм;

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

Используя КСОЛ, можно проводить СОУТ персонала в условиях воздействия ЛИ. Для СОУТ используется таблица 2, построенная на основе градации условий труда, приведенной в «Методике СОУТ» и применения категорий профессионального риска по Р 2.2.1766 – 03 «Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационные основы, принципы и критерии оценки».

В таблице 2 в качестве гигиенических критериев используются максимальные значения КСОЛ на рабочем месте для однократного воздействия ЛИ $R_{\text{СОЛ од max}} = \max_{\text{РМ}} \{ R_{\text{СОЛ}}(X_A, Y_A, Z_A, T_K, \text{ПДУ}) \}$ и для хронического воздействия ЛИ $R_{\text{СОЛ хр max}} = \max_{\text{РМ}} \{ R_{\text{СОЛ}}(X_A, Y_A, Z_A, T_K, \text{ПДУ}_{\text{хр}}) \}$, определенные по формуле (1) с использованием параметров: ПДУ, $\text{ПДУ}_{\text{хр}}$, определенных по СН для однократного и хронического действия ЛИ. Значения $R_{\text{СОЛ од max}}, R_{\text{СОЛ хр max}}$ получают путем вычислений

(измерений) значений энергетических параметров ЛИ в различных точках контроля в пределах РМ и вычислений КСОЛ для выбранных точек контроля.

Т а б л и ц а 2 – Максимальные значения КСОЛ в зависимости от классов (подклассов) вредности и опасности условий труда при воздействии лазерного излучения

Класс условий труда ¹⁾	Уровни ЛИ ¹⁾	$R_{\text{СОЛ ОД max}}$	$R_{\text{СОЛ ХР max}}$	Категория профессионального риска ²⁾	Срочность мероприятий по снижению риска ²⁾
Допустимый – 2	$\leq \text{ПДУ}_{\text{ХР}}$ $< \text{ПДУ}_{\text{ОД}}$	$< 1,0$	$< 1,0$	Пренебрежимо малый (переносимый) риск	Меры не требуются
Вредный – 3.1	$> \text{ПДУ}_{\text{ХР}}$ $\leq \text{ПДУ}_{\text{ОД}}$	$< 1,0$	$\geq 1,0$ < 10	Малый (умеренный)	Требуются меры по снижению риска
Вредный – 3.2	$> \text{ПДУ}_{\text{ОД}}$ $\leq 10 \text{ ПДУ}_{\text{ОД}}$	$\geq 1,0$ < 10	–	Средний (существенный)	Требуются меры по снижению риска в установленные сроки
Вредный – 3.3	$> 10 \text{ ПДУ}_{\text{ОД}}$ $\leq 10^2 \text{ ПДУ}_{\text{ОД}}$	≥ 10 $< 10^2$	–	Высокий (непереносимый) риск	Требуются неотложные меры по снижению риска в установленные сроки
Вредный – 3.4	$> 10^2 \text{ ПДУ}_{\text{ОД}}$ $\leq 10^3 \text{ ПДУ}_{\text{ОД}}$	$\geq 10^2$ $< 10^3$	–	Очень высокий (непереносимый) риск	Работы нельзя начинать или продолжать до снижения риска
Опасный (экстремальный) – 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 (подклассов) условий труда (уровни ЛИ в единицах ПДУ) даны по «Методике СОУТ».

²⁾ Определения категорий ПР и срочности мероприятий по снижению ПР даны по Р 2.2.1776.

Выведены формулы, описывающие распределение энергетической экспозиции сетчатки глаза при его облучении гауссовым лазерным пучком. Использована схема облучения глаза, приведенная на рисунке 3а.

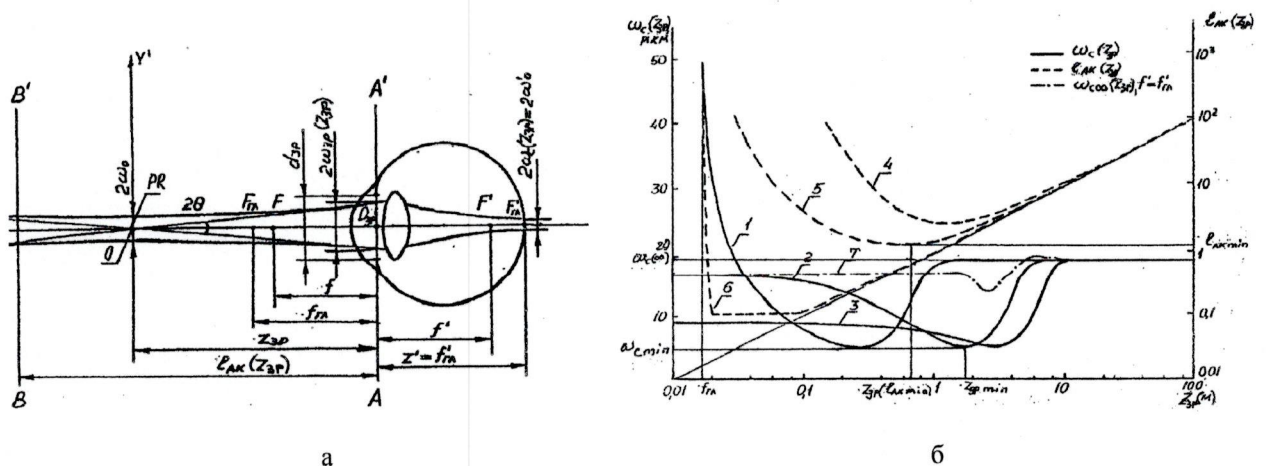


Рисунок 3 – Облучение зрачка глаза гауссовым лазерным пучком: а – схема формирования пятна облучения на сетчатке для наиболее неблагоприятного случая его аккомодации; б – графики зависимости радиуса пятна облучения на сетчатке глаза $\omega_c(Z_{3p})$ и расстояния наилучшей аккомодации $l_{AK}(Z_{3p})$ от расстояния Z_{3p} , построенные для $\lambda = 10^{-6}$ м, $d_{3p} = 7$ мм: 3, 4 – графики, построенные для $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад; 2, 5 – графики, построенные для $\Theta = 10^{-3}$ рад; 1, 6 – графики, построенные для $\Theta = 5 \cdot 10^{-3}$ рад

Принято, что распределение энергетической экспозиции сетчатки описывается формулой Гаусса

$$H_C(r, Z_{3P}) = H_{C \max}(Z_{3P}) e^{\frac{-2r^2}{\omega_C^2(Z_{3P})}}, \quad (2)$$

где $\omega_C(Z_{3P}) = \sqrt{\omega_{CD}^2(Z_{3P}) + \omega_{CAB}^2(Z_{3P})}$ – свертка дифракционной и абберационной составляющих $\omega_{CD}(Z_{3P})$, $\omega_{CAB}(Z_{3P})$ радиуса пятна облучения на сетчатке.¹⁰ После преобразования имеем

$$\omega_C(Z_{3P}) = \lambda f'_{ГЛ} (n' 2r_{3P})^{-1} \{ \gamma^2(Z_{3P}) + 0,81[\xi^{-1}(Z_{3P}) - 1] \}^{1/2}, \quad (3)$$

где $f'_{ГЛ} = 22,365$ мм – заднее фокусное расстояние глаза в покое аккомодации

(аккомодация на бесконечность); $n' = 1,336$ – показатель преломления оптики глаза;¹¹

$$\gamma(Z_{3P}) = 0,64\alpha_{3P}(Z_{3P})\beta_{3P}(Z_{3P}) \quad \text{при } \alpha_{3P}(Z_{3P}) \geq 2,2;$$

$$\gamma(Z_{3P}) = 0,25[3,4 + \alpha_{3P}(Z_{3P})\beta_{3P}(Z_{3P})] \quad \text{при } 0,2 < \alpha_{3P}(Z_{3P}) < 2,2;$$

$$\gamma(Z_{3P}) = 0,9 \quad \text{при } \alpha_{3P}(Z_{3P}) \leq 0,2;$$

$\alpha_{3P}(Z_{3P}) = r_{3P}/\omega_{3P}(Z_{3P})$, где r_{3P} – радиус зрачка; $\omega_{3P}(Z_{3P}) = r_{П}(Z_{3P})$ – радиус пучка.

Графики функции $\omega_C(Z_{3P})$ приведены на рисунке 3б для зрачка диаметром $d_{3P} = 7$ мм (наихудший случай ночного зрения) и для лазерного пучка с параметрами: $\lambda = 10^{-6}$ м (1 мкм); угол расходимости $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-2}$ рад.

При расчетах коэффициент Штреля ξ определялся по данным работы.¹² Из графиков видно, что при удалении плоскости зрачка глаза от перетяжки пучка, радиус пятна облучения на сетчатке в условиях наихудшей аккомодации уменьшается от значения $\omega_C(Z_{3P} \rightarrow 0) = \Theta f'_{ГЛ}/n'$ до некоторого минимального значения $\omega_{C \min} \approx 5$ мкм, что соответствует минимальному диаметру пятна облучения на сетчатке $d_{C \min} \approx 10$ мкм.

Из рисунка 3б следует, что наибольшее значение максимальной энергетической экспозиции (облученности) сетчатки лазерным излучением соответствует наиболее опасному расстоянию $Z_{3P \min}$ острой фокусировки гауссова пучка и аккомодации глаза на плоскость, находящуюся вблизи перетяжки падающего пучка. Результаты, приведенные выше, подтверждены опубликованными результатами расчетов других специалистов в области ЛБ, полученными независимо друг от друга.^{13, 14}

¹⁰ Кибовский В. Т., Кухтевич В. И., Новицкий Л. А. Оценка степени опасности направленных лазерных пучков для глаз человека // Квантовая электроника. 1980. т. 7, №12.

¹¹ Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. Л., 1966. 564 с.

¹² Gubisch R. W. Optical Performance of Human Eye // J. Opt. Soc. Amer. 1967. v. 52, № 3.

¹³ Кириллов А. И., Морсков В. Ф., Устинов Н. Д. Дозиметрия лазерного излучения. М.: Радио и связь, 1983. 192 с.

¹⁴ Желтов Г. И., Глазков В. Н. Распределение интенсивности гауссовых пучков, сфокусированных на сетчатку глаза // ДАН БССР. 1989. 33. С. 414 – 417.

Модель наиболее неблагоприятной фокусировки учтена при разработке гигиенических нормативов для лазерного излучения, установленных в СН 5804 и СанПин 2.2.4 3359.

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-гигиенического контроля средней квалификации. Использована упрощенная схема воздействия на глаз лазерного пучка конической формы (рисунок 4).

Диаметр пучка d_{Π} (мм) излучения на расстоянии Z от плоскости выходного окна ЛИЗ вычисляем по формуле

$$d_{\Pi} = d_{\text{ЛИЗ}} + 10^3 Z \Theta, \quad (4)$$

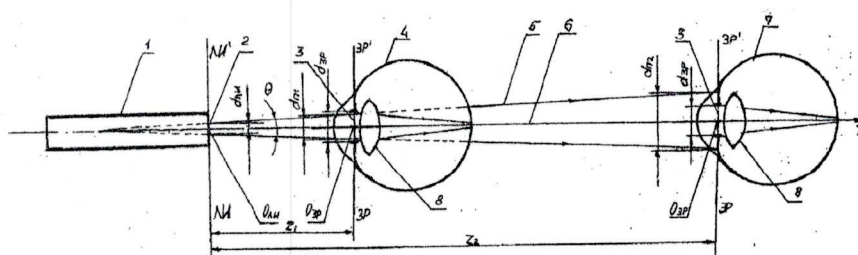


Рисунок 4 – Схема облучения зрачка глаза лазерным пучком: 1 – ЛИЗ; 2 – сечение лазерного пучка в плоскости выходного окна ЛИЗ; 3 – зрачок глаза; 4, 7 – положения глаз, соответствующие расстояниям Z_1 и Z_2 ; 5 – лазерный пучок; 6 – ось лазерного пучка; 8 – хрусталик глаза

где $d_{\text{ЛИЗ}}$ (мм) – диаметр пучка на выходе ЛИЗ; Z (м) – расстояние от выходного окна ЛИЗ.

КСОЛ вычисляем по формуле

$$R_{\text{СОЛ}} = \frac{P_{\text{ЗР}}}{P_{\text{ПДУ}}} = k_{\text{ЗР}} \frac{P}{P_{\text{ПДУ}}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{ЗР}}$ (Вт) = $k_{\text{ЗР}} P$ – мощность лазерного излучения, попадающего в зрачок глаза с диаметром $d_{\text{ЗР}} = 7$ мм; $k_{\text{ЗР}}$ – коэффициент, показывающий долю мощности P лазерного излучения, попадающего в зрачок. Для гауссова лазерного пучка TEM_{00} моды

$$k_{\text{ЗР}} = k_{\text{ЗРГ}} = 1 - e^{-2 \frac{d_{\text{ЗР}}^2}{d_{\Pi}^2(Z)}}. \quad (6)$$

Из уравнения $R_{\text{СОЛ}}(Z_{\text{ЛОЗ}}) = 1$ получаем формулу для вычисления расстояния до границы ЛОЗ

$$Z_{\text{ЛОЗ}} = 10^{-3} \Theta^{-1} \left(9,9 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{ПДУ}}}} - d_{\text{ЛИЗ}} \right). \quad (7)$$

Результаты вычислений по формуле (7) приведены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 – Значения $Z_{\text{ЛОЗ}}$ для ЛИЗ, работающего в спектральном интервале 380 – 600 нм

P , мВт	1	3	5	10	15	20	30	50	100	150	200	300	500
$Z_{\text{ЛОЗ}}$, м	57	102	134	192	236	274	337	437	620	761	879	1078	1394

П р и м е ч а н и е – $Z_{\text{ЛОЗ}}$ вычислены для для пучка TEM_{00} моды: $\Theta = 5 \cdot 10^{-4}$ рад, $d_{\text{ЛИЗ}} = 3$ мм.

По результатам вычислений можно сделать следующие выводы:

- прямое лазерное излучение практически всех лазерных изделий, работающих на ОПР в видимой и ближней ИК областях спектра, является крайне опасным для глаз человека;
- лазерные указки с малой и средней мощностью излучения от 1 мВт до 20 мВт имеют дистанцию вероятного поражения сетчатки глаза до 270 м;
- «синие» и «зеленые» ЛУК с мощностью излучения 100 – 500 мВт могут повредить сетчатку глаза человека на дистанциях до 1400 м;
- любые лазерные указки с мощностью излучения $P \geq 1$ мВт представляют опасность для глаз водителей автомобильного транспорта и членов локомотивных бригад;
- любые лазерные указки с мощностью излучения $P \geq 15$ мВт (т.е. с дальностью неблагоприятного воздействия более 200 м) представляют опасность для глаз пилотов воздушных судов, осуществляющих взлет или посадку.

Проведена ПСОУТ судоводителей, водителей наземных ТС и пилотов ВС при облучении различными видами ЛИЗ, предназначенных для работы на ОПР. Получены следующие результаты. Для лазерного створного маяка «Анемон-3»: $Z_{\text{ЛОЗ}} = 100$ м; условия труда судоводителей допустимые класса 2 при $Z > Z_{\text{ЛОЗ}}$ и вредные подкласса 3.2 при $50 \leq Z < 100$ м. Для лазерной навигационной системы «Глиссада-М»: $Z_{\text{ЛОЗ}} = 416$ м; условия труда пилотов допустимые класса 2 при $Z > Z_{\text{ЛОЗ}}$ и вредные подкласса 3.3 при форс-мажорных обстоятельствах при $100 \leq Z < 416$ м. Для лазерного измерителя скорости «ЛИСД-2Ф»: $Z_{\text{ЛОЗ}} = 8,3$ м; условия труда водителей автотранспорта допустимые класса 2 при $Z > Z_{\text{ЛОЗ}}$ и вредные подкласса 3.2 для водителей и сотрудников ГИБДД при $4 \leq Z < 8$ м.

Для лазерной указки «Laser pointer» с мощностью излучения $P = 10, 20, 30, 50$ мВт для водителей наземных ТС, 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 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.

Для лазерного прицела «EL 888077» ($\lambda = 532$ нм): $Z_{\text{ЛОЗ}} = 67$ м; условия труда водителей ТС вредные подкласса 3.3 при $4 \leq Z < 67$ м. Для ЛДР «Stabila LE»: $Z_{\text{ЛОЗ}} = 38$ м; условия труда водителей ТС вредные подкласса 3.2 при $4 \leq Z < 38$ м.

Общий вывод. Лазерные указки и все другие ЛИЗ, предназначенные для работы на ОПР и имеющие уровень выходной мощности (энергии) превышающий ПДУ, должны продаваться исключительно по разрешению соответствующих органов. Предложение

частично реализовано. В СанПин 2.2.4.3359 имеется пункт 8.4.2.11 «Безопасное применение лазерных изделий на открытых пространствах должно согласовываться с органами Роспотребнадзора ... Не требуется получения согласования при использовании лазеров 1-го класса опасности (ЛИЗ с мощностью $P < P_{\text{ПДУ, авт.}}$). Применение лазерных изделий 3В, 4-го классов (ЛИЗ с мощностью более 5 мВт, авт.) разрешено только в средствах связи и для проецирования на экран».

В третьей главе установлены значения порогов ослепления лазерным излучением (ПДУ ОСЛ) на наиболее опасных для глаз «зеленой» и «синей» длинах волн: $\lambda = 532$ нм, $\lambda = 445$ нм. По данным организации International Laser Display Association (ILDA) установлено, что для лазерного пучка с $\lambda = 532$ нм и мощностью $P = 50$ мВт расстояние до границы зоны ослепления (ЗОС) $Z_{\text{ЗОС } 532} = 250$ м. Принимая $\Theta = 10^{-3}$ рад, по формуле (7) получаем значение порога ослепления лазерным излучением на $\lambda = 532$ нм $P_{\text{ОСЛ } 532} = 0,039$ мВт = $3,9 \cdot 10^{-5}$ Вт. Значение порога ослепления $P_{\text{ОСЛ } \lambda}$ на любой другой λ в видимой области спектра зависит от световой чувствительности глаза и вычисляется по формуле $P_{\text{ОСЛ } \lambda} = k_v(\lambda) \cdot P_{\text{ОСЛ } 532}$, где $k_v(\lambda) = V(532) / V(\lambda)$; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность глаза. Для длины волны 445 нм получаем $P_{\text{ОСЛ } 445} = 0,076$ мВт = $7,6 \cdot 10^{-5}$ Вт.

Для пучка с равномерным распределением интенсивности

$$Z_{\text{ЗОС } \lambda} = 7 \cdot 10^{-3} \Theta^{-1} \sqrt{\frac{P}{P_{\text{ОСЛ } \lambda}}} = 7 \cdot 10^{-3} \Theta^{-1} \sqrt{\frac{k_v^{-1}(\lambda) P}{P_{\text{ОСЛ } 532}}} = 3,54 \cdot 10^{-2} \Theta^{-1} \sqrt{k_v^{-1}(\lambda) P}, \quad (8)$$

где P указывают в мВт. Для пучка TEM_{00} моды вводится дополнительный множитель 1,4.

По результатам вычислений $Z_{\text{ЗОС } 532}$ (таблица 4) можно сделать следующие выводы:

Т а б л и ц а 4 – Значения расстояний до границ зон ослепления пучком TEM_{00} моды

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

- любые лазерные указки и любые другие ЛИЗ гражданского назначения с мощностью излучения $P \geq P_{\text{ОСЛ } \lambda}$ представляют опасность ослепления водителей ТС;

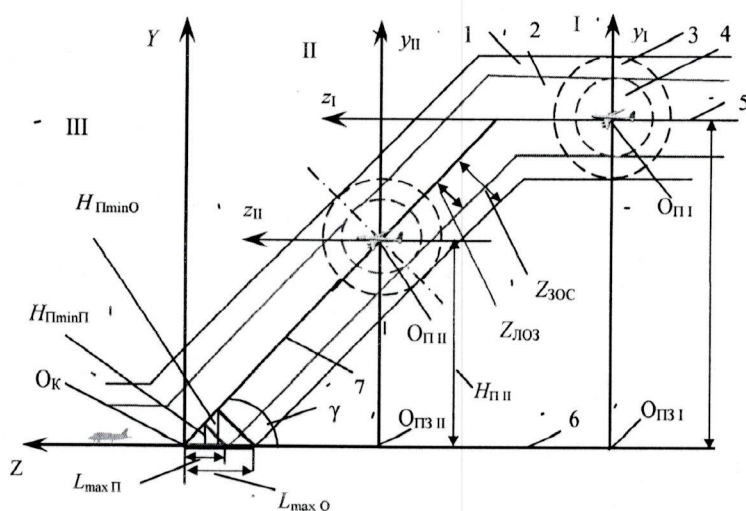
- любые лазерные указки с мощностью излучения $P \geq 5$ мВт представляют опасность ослепления пилотов воздушных судов, осуществляющих взлет или посадку.

По результатам расчетов $Z_{\text{ЛОЗ}}$, $Z_{\text{ЗОС}}$ для ЛУК большой мощности ($P = 1$ Вт при $\lambda = 445$ нм и $P = 0,5$ Вт при $\lambda = 532$ нм) определены размеры зон вероятного неблагоприятного воздействия ЛИ на глаза пилота ВС, осуществляющего посадку. Эти размеры в совокупности с минимальной опасной высотой полета $H_{\text{Пмин}}$, при достижении которой возникает вероятность неблагоприятного воздействия на глаза пилота излучением ЛИЗ, расположенного на земной поверхности, названы пространственными

параметрами зон лазерной опасности для воздушного судна (ПЗЛО ВС). Знание ПЗЛО ВС позволяет провести организационно-технические мероприятия, обеспечивающие лазерную безопасность ВС при посадке, а также выработать критерии применимости юридических санкций к лицам, нарушающим ст. 267.1 УК РФ в отношении ВС.

Рассмотрена обобщенная условная схема полета и посадки ВС (рисунок 5а), находящегося в трех последовательных фазах движения: I – горизонтальный полет параллельно плоскости земной поверхности (ПЗП) (фаза полета); II – плавное снижение и заход на посадку (фаза посадки) и III – движение по ВПП (фаза приземления). Приняты обозначения: ЦВЛ О (СВЛ О) – цилиндрическая (сферическая) область вероятного неблагоприятного воздействия ЛИ по критерию кратковременного ослепления пилота; ЦВЛ П (СВЛ П) – цилиндрическая (сферическая) область вероятного неблагоприятного воздействия ЛИ по критерию поражения сетчатки.

В фазе посадки при пересечении ЦВЛ О и ЦВЛ П с ПЗП образуются плоские фигуры в форме эллипса. Площадки, внутри этих эллипсов названы зонами вероятного воздействия лазерного излучения по критерию ослепления пилота (ЗВЛ О) (1) и по критерию поражения сетчатки глаз (ЗВЛ П) (2) (рисунок 6).



а



б

Рисунок 5: а – обобщенная схема оценки ПЗЛО ВС, находящегося в фазах полета, посадки и приземления: 1 – ЦВЛ О; 2 – ЦВЛ П; 3 – СВЛ О; 4 – СВЛ П; 5 – курс полета; 6 – ПЗП; 7 – глиссада; б – внутренний вид кабины пилота гражданского ВС

В фазе посадки при пересечении ЦВЛ О и ЦВЛ П с ПЗП образуются плоские фигуры в форме эллипса. Площадки, внутри этих эллипсов названы зонами вероятного воздействия лазерного излучения по критерию ослепления пилота (ЗВЛ О) (1) и по критерию поражения сетчатки глаз (ЗВЛ П) (2) (рисунок 6). Расстояния $L_{\max O}$, $L_{\max П}$ от точки касания O_K до наиболее удаленных точек ЗВЛ О и ЗВЛ П равны длинам больших полуосей эллипсов, ограничивающих ЗВЛ О и ЗВЛ П. Для ВС типа самолета (например,

авиалайнеров) углы глиссады γ имеют малые значения ($\gamma \approx 3$ угл. град). Тогда считаем $L_{\max O} = \gamma^{-1} Z_{\text{ЗОС}}$, $L_{\max П} = \gamma^{-1} Z_{\text{ЛОЗ}}$ (рисунок 5а). Для обобщенного случая модели точечного ВС уязвимого со всех сторон для лазерного пучка (рисунок 5а) при $Z_{\text{ЗОС}} \approx 1150$ м (для ЛУК с $\lambda = 445$ нм, $P = 1$ Вт) получаем $L_{\max O} = 24$ км; при $Z_{\text{ЛОЗ}} \approx 1200$ м (для ЛУК с $\lambda = 532$ нм, $P = 0,5$ Вт) получаем $L_{\max П} = 20$ км.

ВС гражданской авиации имеют кабину пилота, расположенную в верхней части фюзеляжа, а обзор окружающего пространства осуществляется через смотровое окно,

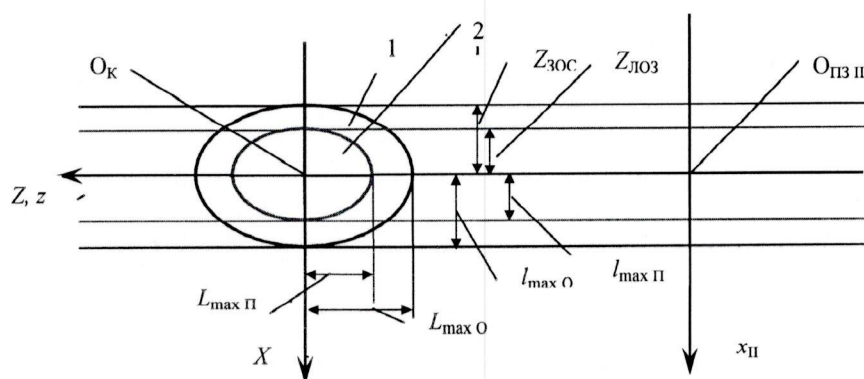


Рисунок 6 – Обобщенная схема оценки параметров зон лазерной опасности для ВС, находящегося в фазах посадки и приземления в проекции на плоскость земной поверхности:
1 – ЗЛ О; 2 – ЗЛ П

расположенное перед пилотом на некоторой высоте над полом кабины (рисунок 5б).

При движении по глиссаде в начальной области эллиптической ЗЛ О кабина пилота 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). Пучки не могут проникнуть в кабину пилота и не представляют никакой угрозы безопасности полета. Проведена оценка минимальной высоты полета $H_{\text{Пmin}}$ и минимальных углов цели α_{min} , при которых лазерный пучок может попасть в глаза пилота ВС, находящегося на рабочем месте.

При оценке использовались типичные значения параметров рабочего места пилота ВС, в частности: высота нижней кромки смотрового окна над осью симметрии $h_{\text{ОК}} = 60$ см, полуширина окна $l_{\text{ОК}} = 150$ см. Для «синей» ЛУК ($\lambda = 445$ нм), имеющей $Z_{\text{ЗОС}} = 1200$ м, при $\gamma = 3$ угл. град. получены следующие результаты: $\alpha_{\text{min}} = 20$ угл. град, $H_{\text{ПminO}} \approx 410$ м, $L_{\max O} = 8,2$ км, $l_{\max O} = 1130$ м. Уточнение значения $L_{\max O}$ с учетом угла поля зрения пилота $2\beta_{\text{ЗР}} = 120$ угл. град приводит к результатам: $L_{\max O} = 7,6$ км, $l_{\max O} = 1040$ м.

По результатам вычислений можно сделать следующий вывод.

Расстояние от края ВПП до границы зоны вероятного ослепляющего воздействия на пилота гражданского ВС излучением наземного ЛИЗ 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 (с учетом коэффициента запаса по безопасности).

В четвертой главе приведены и обоснованы требования к лазерным дозиметрам, основанные на гигиенических нормах ЛИ, регламентированных в СН 5804 (таблица 5).

Т а б л и ц а 5 – Требования к диапазонам измерений и пределам допускаемых основных погрешностей лазерных дозиметров для спектрального диапазона 0,38 – 1,40 мкм

Рабочая длина волны, мкм	Диапазон измерений $H_{И}, H_{И\max},$ $W_{И}, W_{И\max}$	$\delta_{H},$ $\delta_{W},$ %	Диапазон измерений $E, E_{\max},$ $P, P_{\max}$	$\delta_E,$ $\delta_P,$ %	Диапазон измерений $H_{\Sigma\text{ИМ}}, H_{\Sigma\text{НП}},$ $W_{\Sigma\text{ИМ}}, W_{\Sigma\text{НП}}$	$\delta_{H\Sigma},$ $\delta_{W\Sigma},$ %
0,45; 0,53; 0,65; 0,91; 1,07	$10^{-4} - 1 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ $10^{-8} - 10^{-4} \text{ Дж}$	± 25	$10^{-2} - 10^2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ $10^{-6} - 10^{-2} \text{ Вт}$	± 20	$10^{-4} - 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$ $10^{-8} - 10^{-1} \text{ Дж}$	± 25

Предложен метод интегрирования с автосинхронизацией (МИА), на основе которого разработаны схмотехнические решения лазерных дозиметров: ИЛД-2М, ЛДМ-2, ЛАДИН, широко применяющихся в практике инструментального контроля лазерного излучения. Наиболее простая структурная схема ЛД, реализующая МИА с привязкой к заднему фронту импульса приемника излучения приведена на рисунке 7а. На рисунке 7б приведены временные диаграммы напряжений на выходах блоков схемы.

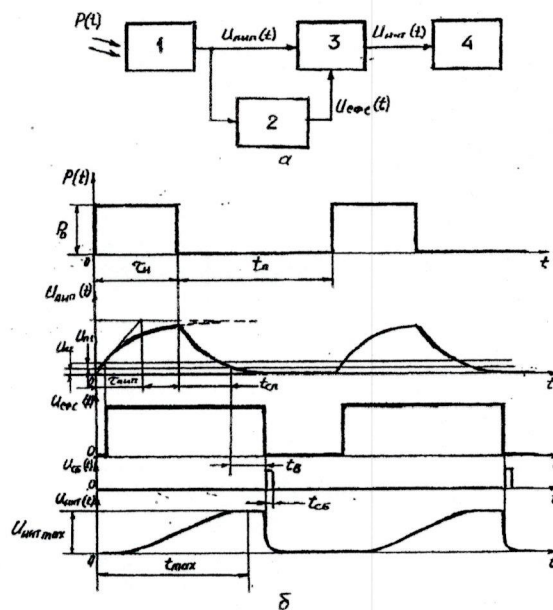


Рисунок 7: а – Структурная схема лазерного дозиметра, реализующая МИА; б – временные диаграммы напряжений на выходах блоков схемы: 1 – первичный измерительный преобразователь (ПИП), 2 – схема формирования синхроимпульсов, 3 – интегратор (ИНТ), 4 – измеритель импульсных напряжений

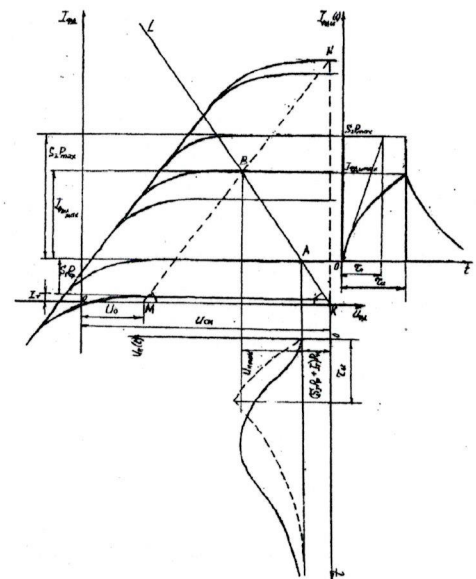


Рисунок 8 – Вольтамперные характеристики фотодиода и временные диаграммы импульсного тока фотодиода $I_{\text{ФД}}(t)$ и напряжения на нагрузочной цепи $U_{\text{Н}}(t)$

Результаты анализа работы схемы ЛД, реализующей МИА с привязкой к заднему фронту импульса первичного измерительного преобразователя (ПИП), показывают, что возможность работы схемы в заданном диапазоне энергии импульсов обеспечивается, прежде всего, постоянной времени ПИП $\tau_{\text{ПИП}}$, выбор которой, в свою очередь, зависит от

требуемого диапазона длительностей импульсов и наибольшей частоты их повторения. Во всех разработанных ЛД для измерений в области спектра 380 – 1800 нм используются полупроводниковые фотодиоды (ФД). Определен наибольший динамический диапазон ЛД, использующего ФД, в режиме измерений энергии импульсов лазерного излучения.

В результате анализа схемы включения ФД, осуществляющей первичное интегрирование фототока I_{Φ} с допустимой погрешностью нелинейности, обусловленной выбором линейного режима преобразования импульса ЛИ (рисунок 8), выведена формула для расчета верхнего предела измерений ЛД при измерении энергии импульса ЛИ

$$W_{\text{и max}} = \frac{[(U_{\text{см}} - U_0) - (I_{\Phi} + I_T)R_H]\tau_{\text{и}}}{\tau_{\text{оп}}S_I \left[r \left(1 - e^{-\tau_{\text{и}}/\tau_0} \right) + R_H \left(1 - e^{-\tau_{\text{и}}/\tau_{\text{ФД}}} \right) \right]}, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{оп}}$ – коэффициент пропускания оптической системы, входящей в фотоприемное устройство, S_I – чувствительность ФД (А/Вт), R_H – сопротивление нагрузки.

Получена формула для расчета нижнего предела измерений ЛД

$$W_{\text{и min}} = \mu_{\text{сш}} \frac{\left(\overline{U_{\text{ш}}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tau_{\text{и max}}}{\tau_{\text{оп}}S_I R_H \eta}, \quad (10)$$

где $\mu_{\text{сш}}$ – требуемое отношение «сигнал – шум»; $\eta = \tau_{\text{и}}/\tau_{\text{инт}}$; $\tau_{\text{инт}}$ – постоянная времени ИНТ.

Разработаны и внедрены методы поверки лазерных дозиметров. Выведены формулы вычислений пределов основных погрешностей поверяемых дозиметров при передаче единиц измерений от рабочих эталонов 2-го разряда (образцовых средств измерений) ПВЦ-2 и ЛД-4Э поверяемому рабочему средству измерений (дозиметру).

Разработаны методики дозиметрического контроля на рабочих местах с помощью лазерных дозиметров. Точки контроля выбирают на границе рабочей зоны (ГРЗ) оператора или на границе зоны возможного повреждения глаз (ГЗГ). Определение ГРЗ или ГЗГ проводят, устанавливая 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» и ГОСТ 12.2.033 – 78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования».

Предложен порядок выбора точек контроля на ГРЗ или ГЗГ для различных случаев падения лазерного пучка на плоскость воздействия (вертикальное и горизонтальное падение, падение под углом к нормали). Методики вошли в ГОСТ Р 12.1.031 – 2010.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты.

1. 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 стандарта «ССБТ. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий», гармонизированного с СН и СанПин.

2. Предложена и обоснована обобщенная методика специальной оценки условий труда на рабочих местах при воздействии ЛИ на основе применения результатов вычислений максимальных значений коэффициентов степени опасности лазерного излучения на рабочих местах с использованием ПДУ по СН 5804 и применения градации условий труда в соответствии с Приложением 18 к «Методике проведения специальной оценки условий труда», утв. Приказом Минтруда России от 24.01.2014 г. № 33н.

3. Разработаны расчетные методы оценки степени опасности лазерных пучков, учитывающие специфику взаимодействия ЛИ с оптической системой глаза. Выведена формула для вычисления максимального значения энергетической экспозиции сетчатки глаза в условиях его облучения гауссовым пучком основной TEM_{00} моды и формула определения диаметра минимально возможного пятна облучения (10 мкм) на сетчатке при наихудшей аккомодации глаза на плоскость, расположенную вблизи перетяжки пучка. Результаты вычислений учитывались при разработке ПДУ, установленных в СН 5804. Разработана упрощенная методика вычисления коэффициентов степени опасности ЛИ и расстояний до границ лазерно опасных зон. Проведена предварительная специальная оценка условий труда водителей наземных ТС и пилотов ВС в условиях воздействия пучков ЛИ, генерируемых различными ЛИЗ, работающими на открытых пространствах (лазерные маяки навигационных систем, лазерные измерители скорости, лазерные указки, лазерные прицелы, лазерные дальномеры-рулетки).

4. Разработаны методы оценки степени ослепления лазерными пучками, основанные на гигиеническом нормативе – предельно допустимый уровень ослепления лазерным излучением ПДУ ОСЛ. ПДУ ОСЛ вычислен с использованием зарубежных данных о расстояниях до границ зон ослепления пилотов ВС лазерным пучком с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Предложена методика определения расстояний до границ зон лазерной

угрозы эксплуатации ВС. Результаты вычислений: 8 км вдоль оси взлетно-посадочной полосы и 1 км влево и вправо от ВПП; минимальная высота полета, при которой возникает лазерная угроза, равна 500 м.

5. Разработаны схмотехнические решения средств инструментального контроля безопасности ЛИ (лазерных дозиметров), реализующие метод интегрирования с автосинхронизацией и обеспечивающие возможность проведения измерений в широком динамическом диапазоне измеряемых энергетических параметров при широком диапазоне длительностей и частот повторения импульсов ЛИ. Схмотехнические решения выполнены на уровне изобретений, защищенных авторскими свидетельствами и патентом. Разработаны методы поверки лазерных дозиметров и соответствующая поверочная установка, обеспечившие единство измерений в области лазерной дозиметрии, а также методы дозиметрического контроля на рабочих местах (вошли в ГОСТ Р 12.1.031 – 2010).

6. 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, установленных в СН 5804 – 91, с целью изучения возможности (или невозможности) увеличения значений ПДУ для их сближения со значениями МРЕ, регламентированными в IEC 60825-1;

- 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, в том числе разработка нового стандарта «ССБТ. Безопасность лазерной продукции. Расчетные и инструментальные методы лазерной дозиметрии на открытых пространствах»;

- внесение изменений в ГОСТ 31581 – 2012 в части классификационной схемы ЛИЗ с целью приведения схемы в соответствие требованиям СН 5804 – 91

- 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.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Кибовский, В.Т. Оценка степени опасности направленных лазерных пучков для глаз человека [Текст] / В.Т.Кибовский, В.И.Кухтевич, Л.А.Новицкий // Квантовая электроника. – 1980. - т. 7, №12. – С. 2523-2530.
2. Кибовский, В.Т. Измерение энергии импульсов оптического излучения в широком диапазоне длительностей и частот повторения [Текст]/В.Т.Кибовский, Ф.Х.Клычев, В.И.Кухтевич, Ш.А.Рубин //Измерительная техника. – 1981.- №3. – С. 32- 34.
3. Рахманов, Б.Н. Нормативное и правовое регулирование безопасного применения лазерной техники [Текст] / Б.Н. Рахманов, В.Т.Кибовский // Безопасность в техносфере. – 2013.- №3.– С. 60-69.
4. Рахманов, Б.Н. Противодействие нарастанию лазерной угрозы безопасности жизнедеятельности методами лазерной дозиметрии на открытых пространствах [Текст]// Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Безопасность жизнедеятельности.– 2013.- № 8.– С. 41-47.
5. Рахманов, Б.Н. Метрологическое обеспечение лазерной безопасности [Текст]// Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Безопасность в техносфере. – 2013.- № 6. – С. 3-13.
6. Рахманов, Б.Н. Вопросы технического регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры. Часть I. Технические регламенты Таможенного союза [Текст]// Б.Н.Рахманов, В.А.Девисилов, А.В.Митрофанов, В.Т.Кибовский // Фотоника. – 2013.- № 6/42. – С. 46-60.
7. Рахманов, Б.Н. Вопросы технического регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры. Часть II. Предложения по разработке новой системы национальных стандартов по лазерной безопасности [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.А.Девисилов, А.В.Митрофанов, В.Т.Кибовский // Фотоника. – 2014.-№ 1/43. – С. 28-37.
8. Рахманов, Б.Н. Тридцатилетний опыт разработки системы лазерной безопасности в России [Текст] // Б.Н.Рахманов, В.А.Девисилов, А.В.Митрофанов, В.Т.Кибовский // Безопасность труда в промышленности. – 2014. - № 1. – С. 33-39.
9. Рахманов, Б.Н. О правовой ответственности за создание лазерных угроз [Текст]// Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Мир транспорта. – 2014. - № 1. – С. 146-155.

10. Рахманов, Б.Н. Лазерная техника и безопасность. Вчера. Сегодня. Завтра. Часть 1 [Текст] / Б.Н.Рахманов, Ю.П.Пальцев, В.Т.Кибовский, В.А.Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2014. - № 4. – С. 67-81.
11. Рахманов, Б.Н. Лазерная техника и безопасность. Вчера. Сегодня. Завтра. Часть 2 [Текст] / Б.Н.Рахманов, Ю.П.Пальцев, В.Т.Кибовский, В.А.Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2014. - № 5. – С. 47-57.
12. Рахманов, Б.Н. Лазерная техника и безопасность. Вчера. Сегодня. Завтра. Часть 3 [Текст] / Б.Н.Рахманов, Ю.П.Пальцев, В.Т.Кибовский, В.А.Девисилов // Безопасность в техносфере. – 2014. - № 6. – С. 75- 85.
13. Рахманов, Б.Н. Определение размеров зон лазерной угрозы воздушным судам [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Мир транспорта. – 2015. - № 1. – С. 162-181.
14. Рахманов, Б. Лазер. Все же какого он класса опасности? Часть I / Б.Рахманов, В.Кибовский // Фотоника. – 2015. - № 5. – С. 42-49.
15. Рахманов, Б.Н. Проблема противоречий в нормативной базе лазерной безопасности [Текст] / Б.Н.Рахманов, Ю.П. Пальцев, В.Т. Кибовский // Гигиена и санитария. – 2017. - № 6. – С. 535-540.

Публикации в прочих изданиях

1. Кибовский, В.Т. Универсальный измеритель энергетических характеристик излучения [Текст] / 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.
2. Гребенщиков, И.И. Измерение энергии повторяющихся импульсов излучения методом интегрирования с автосинхронизацией [Текст] / И.И.Гребенщиков, В.Т.Кибовский // Импульсная фотометрия. Сб. статей. Вып. 5. – Л.: Машиностроение. 1978. – С. 89-93.
3. Кибовский, В.Т. Универсальный лазерный дозиметр ИЛД-2 [Текст]/ В.Т.Кибовский, Ф.Х.Клычев, Ш.А.Рубин – Дозиметрия лазерного излучения. Сб. научных трудов. Под ред. д. ф.-м.н., проф. Б. М. Степанова. – М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 1984. – С. 40-51.
4. Алексеев, А.Г. Оценка степени опасности рассеянного лазерного излучения [Текст] / А. Г. Алексеев, В. Т. Кибовский, С. А. Коновалов, Б. Н. Рахманов // Дозиметрия лазерного излучения. Сб. научных трудов. Под ред. д. ф.-м.н., проф. Б.М.Степанова. – М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 1984. – С. 23-39.
5. Кузнецов, П.А. Методы градуировки и поверки лазерных дозиметров с использованием рассеянного излучения [Текст] / 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.

6. Кибовский, В.Т. Лазерное излучение [Текст] / 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.

7. Рахманов, Б. Н. Приборы дозиметрического контроля лазерного и ультрафиолетового излучения. Каталог [Текст] / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский. – М.: Изд-во МИОТ, 1994. – 28 с.

8. Рахманов, Б.Н. К 30-летию системы лазерной безопасности в России. Современные проблемы в области нормативного и правового регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Лазер-Информ. – 2013. - выпуск № 17 (512). – С. 1-6.

9. Рахманов, Б.Н. К 30-летию системы лазерной безопасности в России. Современные проблемы в области нормативного и правового регулирования безопасного применения лазерной аппаратуры [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Лазер-Информ. – 2013. - выпуск № 18 (513). – С. 1-9.

10. Рахманов, Б.Н. Оценка степени опасности и ослепляющего действия лазерных изделий, работающих на открытых пространствах в видимой и ближней ИК областях спектра [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. – 2014. - № 1. – С. 1-24.

11. 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 [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Лазер-Информ. – 2014. -выпуск № 6.

12. Рахманов, Б.Н. Лазерная безопасность. Документы новые – проблемы старые [Текст] / Б.Н.Рахманов, В.Т.Кибовский // Лазер-Информ. – 2016. – выпуск № 21-22.

Тезисы в сборниках трудов научно-технических конференций

1. Гребенщиков, И.И. Средства измерений для оптической дозиметрии [Текст] / И.И.Гребенщиков, В.Т.Кибовский, В.И.Кухтевич // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: сб. тез. докл. 2-ая Всесоюзная науч.-технич. конф. – М.: 1976. – М.: Изд-во ВНИИОФИ, 1976. – С. 354, 355.

2. Кибовский, В.Т. Лазерные дозиметры ИЛД-1, ИЛД-2 [Текст] / В.Т.Кибовский, Ф.Х.Клычев, В.И.Кухтевич и др. // Применение лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике: сб. тез. докл. II Всесоюзная науч.-технич. конф. – М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1979. – С. 513, 514.

3. Кибовский, В.Т. Некоторые вопросы метрологического обеспечения лазерной дозиметрии [Текст] / В.Т.Кибовский, А.И.Кириллов, В.И.Кухтевич, В.И.Сачков // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: сб. тез. докл. III Всесоюзная науч.-технич. конф. – М.: 1979. – С. 308.

4. Гаценко, Л.С. Характеристики поверхностно-барьерных фотодиодов при импульсном облучении [Текст] / Л.С.Гаценко, В.Т.Кибовский, Ф.Х.Клычев, Ш.А.Рубин // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: сб. тез. докл. III Всесоюзная науч.-технич. конф. – М.: Изд-во ВНИИОФИ. 1979. – С. 352.

5. Кибовский В.Т. К вопросу об оценке степени опасности направленных лазерных пучков [Текст] / В.Т.Кибовский, В.И.Кухтевич, Л.А.Новицкий // Применение лазеров в науке и технике: сб. тез. докл. Всесоюзная науч.-технич. конф.. – Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1980. – С. 129.

6. Дюжева, А.Я. Гигиеническая оценка условий труда и состояния здоровья медицинских работников, контактирующих с лазерами [Текст] / А.Я.Дюжева, А.А.Комарова, В.И. Кухтевич, В.Т.Кибовский, В.П.Башилов // Гигиенические аспекты использования лазерного излучения в народном хозяйстве: сб. науч. трудов. 1-ая республиканская науч. -практ. конф. – М.: МНИИ гигиены им. Ф.Ф.Эрисмана, 1982. – С. 32-35.

7. Кибовский В.Т. Современное состояние лазерной безопасности [Текст] / В.Т.Кибовский, В.Е.Прокопенко // Фотометрия и ее метрологическое обеспечения: сб. тез. докл. 19-ая Всероссийская науч.-технич. конф.. – М.: Изд-во ВНИИОФИ, 2008.

Авторские свидетельства и патент

1. Авт. св. №533832 от 07.07.1976. Кибовский В.Т. Устройство для измерения энергетических параметров световых импульсов.

2. Авт. св. №1141846 от 22.10.1984. Кибовский В.Т., Кузнецов П.А., Рахманов Б.Н. Лазерный дозиметр.

3. Авт. св. №1571813 от 15.02.1990. Кармолин А.Л., Кибовский В.Т., Рахманов Б.Н. и др. Многоцелевой лазерный дозиметр.

4. Патент SU 1817836 А от 23.05.93. Кашуба В.А., Кибовский В.Т., Григорьев В.А. Устройство оперативного дозиметрического контроля лазерного излучения опасного для глаз человека.

Подписано в печать 13. 12 2017г.

Формат бумаги 60x84/16

Заказ № 1774

Объем 1,5 усл. п.л.

Тираж 80 экз

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр.9,

УПЦ ГИ РУТ (МИИТ)