НОРМАТИВЫ ПО ЛАЗЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: ИСТОКИ, УРОВЕНЬ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Г.И.Желтов, д.ф.-м.н.,
Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси, Минск

Введение в 2009 году на территории СНГ копии европейского стандарта IEC 60825-1-2007 Safety of laser products параллельно с действующими Санитарными нормами и правилами положило начало неразберихе в нормативном законодательстве. Узаконенные нормативы содержат комплекс взаимно исключающих требований. Актуальность вопроса в том, что подобная нелепость общегосударственного уровня вообще стала возможной из-за игнорирования проблем безопасности людей, эксплуатирующих лазерную технику с наступлением периода "перестройки", то есть еще раньше введения стандарта лет на пятнадцать. В России отсутствует научное сопровождение этой проблемы, не существует ответственной за ее решение действующей головной организации. Если оставить все как есть, ситуация будет динамично ухудшаться.

ВВЕДЕНИЕ

Защита от открытого лазерного излучения является частью большой проблемы, корни которой уходят глубоко в коммерческий характер индустриального использования лазерных технологий. Их внедрение привело к возникновению новых источников угроз здоровью человека, непривычных для классических методов обеспечения безопасности [1–7]. В предлагаемой статье обсуждается ряд вопросов, связанных с условиями безопасной эксплуатации лазерной аппаратуры и формированием соответствующей нормативной базы.

На территории России и союзных государств действует несколько противоречивых нормативных документов [1]. Причем запланированное на 2017 год издание обновленных Санитарных норм и правил – СанПиН 2.2.4.3359-16 [2] никоим образом ситуацию не нормализует.

STANDARDS FOR LASER SAFETY: SOURCES, LEVEL, PERSPECTIVES

G.I.Zheltov, Dr. Sci. in Physics and Mathematics,
B.I.Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk

Adoption in the territory of the CIS in 2209 in the territory of the CIS of a copy of European standard IEC 60825-1-2007 Safety of laser products in parallel with the existing Sanitary Standards (Public Health Regulations) has laid the foundation to confusion in the normative legislation. The both of legalized standards contain the whole complex of mutually excluding requirements. Relevance of the issue is that this absurd of nation-wide level has become possible because of ignoring the problems of safety of the people operating laser technology after period of "perestroika" that is, for about fifteen years even earlier. In Russia there is no scientific maintenance of this problem, there is no operating parent organization responsible for the solution the problem. The situation will dynamically worsen unless resolved.

INTRODUCTION

Protection against open laser radiation is a part of a major problem which roots deeply to commercial nature of industrial use of laser technologies. Their implementation has led to emergence of new sources of threats to health of the person, unusual for classical methods of safety [1–7]. This article discusses a number of problems connected with conditions of safe operation of laser equipment and forming corresponding regulatory base.

There are some inconsistent normative documents in the territory of Russia and Union States [1]. On top of everything, the edition of the updated Sanitary Standards and the Rules SanPiN 2.2.4.3359–16 [2] planned for 2017 does not normalize situation whatsoever. The source of contradictions is introduction of 2009 of the Russian language version of the European standard of the International Electrotechnical Commission IEC 60825–1–2007 Safety of laser products – Part 1: Equipment classification. Requirements and user guide. It was positioned as GOST R IEC 60825–1–2009. The latest version of this standard with small improvement of translation quality is GOST IEC 60825–1–2013 (hereinafter referred to as GOST IEC). GOST IEC in many parameters is inadequate to "Sanitary standards and rules of the

DOI:10.22184/1993-7296.2017.61.1.10.35

Источник противоречий – ввод в действие в 2009 году русскоязычной версии европейского стандарта Международной электротехнической комиссии IEC 60825-1-2007 Safety of laser products – Part 1: Equipment classification. Requirements and user guide. Он позиционировался как ГОСТ Р МЭК 60825-1-2009. Последняя версия этого стандарта с небольшим улучшением качества перевода – ГОСТ IEC 60825-1-2013 (далее – ГОСТ IEC). ГОСТ IEC по многим параметрам неадекватен действующим в СНГ в период 1991–2016 годов "Санитарным нормам и правилам устройства и эксплуатации лазеров №5804-91" (далее СанПиН-91). Величины ПДУ облучения глаз, определяемые указанными документами, в отдельных случаях различаются на несколько порядков (!). Возникает масса вопросов о правовом статусе СанПиН и целесообразности использования ГОСТа IEC в предложенном виде.

Совершенно очевидно, что введению нового стандарта, связанного с охраной здоровья людей, должен был предшествовать детальный анализ различий упомянутых документов и причин, обусловивших эти различия. Такой анализ с привлечением специалистов соответствующего профиля по моим данным не проводился. Таким образом, вопрос о том, чем мы платим за унификацию наших нормативов с западноевропейскими аналогами, проигнорирован. Проблема сопоставления и последующий прогноз потенциальных последствий неразберихи, вносимой совместным введением указанных документов, – достаточно объемная задача. В рамках журнальной статьи можно попытаться выделить часть наиболее острых моментов и пунктирно наметить возможные пути улучшения ситуации.

Приведенный в статье список литературы по обсуждаемой проблематике далеко не полон. Обширный объем информации о доступных публикациях можно найти, например, в объемной монографии [3]. В ней подробно представлены идеология и научная база как первых американских, так и более поздних западноевропейских нормативных документов, определяющих безопасные условия при работе с лазерами. Достаточно обширный список литературы приложен к докладу [4]. Из последних монографий, по-видимому, можно рекомендовать книгу [5], включающую раздел, посвященный безопасности при эксплуатации лазерной аппаратуры. История и принципы построения

device and operation of lasers No. 5804–91" existing in the CIS during 1991–2016 (hereinafter referred to as SanPiN-91). The MPE (Maximal Permissible Exposure) values of radiation for eyes determined by the specified documents in some cases differ by some orders (!). There is a mass of questions of legal status of SanPiN and expediency of use of GOST IEC in the suggested form.

It is obvious that the detailed analysis of differences of the mentioned documents and the reasons which have caused these differences had to be preceded by the introduction of the new standard connected with health care. Such analysis with involvement of specialists of the corresponding profile was not carried out according to my data. Thus, the question of how we pay for unification of our standards with the Western European analogs has been ignored. The problem of comparison and the subsequent forecast of potential effects of the confusion brought by joint introduction of the specified documents is a rather volume task. Within the article it is possible to try to allocate a part of the most critical moments and roughly plan possible ways of improvement of this situation.

The references provided herein on the discussed perspective are not full. The extensive information content about available publications can be found, for example, in the bulky monograph [3]. It represents the ideology and scientific base both the first American, and later Western European normative documents defining safe conditions during the work with lasers in detail. Rather extensive bibliography is provided in the published report [4]. From the last monographs, apparently, it is possible to recommend the book [5] including the section devoted to safety when operating laser equipment. The history and the principles of creation of SanPiN-91 are briefly stated in article [6]. The current adjustments of the European and American standards are, as a rule, discussed in the Health Physics magazine and on the web-site of ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) http://www.icnirp.org/.

This article draws attention to disagreements in assessment of maximum permissible values of the power radiation characteristic between SanPiN-91 and of IEC standards, as well as (as far as possible) the sources of these disagreements. "Pathogenesis' of disagreements is closely connected with history of creation of the discussed documents. Therefore duplication of some materials from article [6] was inevitable. We will focus on the analysis of problems of safety at single direct irradiation of eyes with collimated flows of monochromatic radiation and we

СанПиН-91 кратко изложены в статье [6]. Текущие корректировки европейских и американских нормативов, как правило, обсуждаются в журнале Health Physics и на сайте ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) http://www.icnirp.org/.

В предлагаемой статье основное внимание будет уделено разногласиям в оценке предельно допустимых значений энергетических характеристик излучения между СанПиН-91 и нормативами IEC, а также (по мере возможности) источникам этих разногласий. "Патогенез" разногласий тесно связан с историей создания обсуждаемых документов. Поэтому дублирование некоторых материалов из статьи [6] оказалось неизбежным. Мы ограничимся анализом проблем безопасности при однократном, прямом облучении глаз коллимированными потоками монохроматического излучения и будем использовать следующие термины и сокращения: **ПДУ** (предельно допустимый уровень) – значение энергетической характеристики излучения, воздействие которого, в данном случае, на глаза человека создает опасность потенциального необратимого повреждения нативной структуры тканей (и иных изменений в организме человека) с вероятностью, не превышающей 0,1%. Для обозначения соответствующих характеристик используются обозначения с индексом "пду": $E_{пду}$ (Вт/м^2) – облученность, $H_{пду}$ (Дж/м^2) – энергетическая экспозиция, $Q_{пду}$ (Дж) – энергия излучения. **МДЭ** (максимально допустимая экспозиция) – термин, используемый в русскоязычной версии стандарта IEC, означающий по смыслу то же, что ПДУ. Далее, чтобы облегчить сравнение величин, рекомендуемых рассматриваемыми документами, мы будем именовать как МДЭ значения, относящиеся к стандарту IEC ($E_{мдэ}$, $H_{мдэ}$, $Q_{мдэ}$) и, соответственно, ПДУ, относящиеся к СанПиН-91 ($E_{пду}$, $H_{пду}$, $Q_{пду}$).

Пороговые значения энергетических характеристик лазерного излучения – значения энергетических характеристик потока излучения, воздействие которого на ткани глаз вызывает минимальные (ниже уточним), офтальмоскопически наблюдаемые, необратимые изменения тканей с вероятностью 50%. Исходные характеристики светового потока измеряются в плоскости роговицы глаза. Фиксация повреждений сетчатки или роговицы осуществляется через определенный интервал времени (обычно через 1 час). Эти величины обозначаются как

will use the following terms and abbreviations: **PLI** (permissible level of irradiation) is a value of the power radiation characteristic which impacts (in this case) the eyes of the person creating risk of potential irreversible damage of native structure of tissues (and other changes in human organism) with the probability not exceeding 0.1%. For designation of the corresponding characteristics, MPL index is used: E_{PLI} (W/m^2) – irradiance, H_{PLI} (J/m^2) – power exposure, Q_{PLI} (J) – radiation energy. **MPE** (maximum permissible exposure) is the term used in the IEC standard, having the same meaning as PLI. Hereinafter, in order to facilitate comparison of the values recommended by the considered documents we will denominate MPE as the values relating to the IEC standard (to E_{MPE}, H_{MPE}, Q_{MPE}) and, respectively, PLI shall relate to SanPiN-91 (E_{PLI}, H_{PLI}, Q_{PLI}).

Threshold values of power characteristics of laser radiation shall mean the values of power characteristics of radiation flow which impact on tissues of eyes causing minimum (as will be specified below) ophthalmoscopically detected irreversible changes of tissues with probability of 50%. Initial characteristics of luminous flux are measured in the eye cornea plane. Injuries of retina or cornea are determined through certain interval of time (normally in 1 hour). These values are designated as ED_{50} (irradiance), HD_{50} (power exposure), QD_{50} (radiation energy).

General sequence of creation of the discussed normative documents shall be reminded. The first step, obviously, is the pilot study of dependency of threshold power characteristics of laser radiation on conditions of influence and properties of the irradiated object. In relation to single laser exposure of eyes it is the dependence of ED_{50} (HD_{50}) on exposure duration τ in the range of, about, $10^{-13}<\tau<10^4$ s, wavelengths λ ($180<\lambda<10^5$ nm) and typical dimension of the irradiated area (diameter of laser spot) d (about $10^{-5}<d<10^{-2}$ m). At the first stage the eyes of laboratory animals are used as objects of radiation in vivo. In our case it is rabbits of pigmental breeds (usually chinchilla gray) and then monkeys in testing experiment (most often rhesus monkey).

Detailed pilot studies in all specified intervals of parameters are tremendously bulky concerning their volume. Therefore the technique consists of search of some basic dependency, for example, ED_{50} (τ) at fixed λ, d in interval of τ, available to the existing laser technology. Then based on the theoretical models and the fragmentary researches, ED_{50} (λ, d) at the fixed τ creates overall picture of ED_{50} (τ, λ,

ED_{50} (облученность), HD_{50} (энергетическая экспозиция), QD_{50} (энергия излучения).

Напомним в общих чертах последовательность создания обсуждаемых нормативных документов. Первым шагом, очевидно, является экспериментальное исследование зависимостей пороговых энергетических характеристик лазерного излучения от условий воздействия и свойств облучаемого объекта. Применительно к однократному лазерному облучению глаз это зависимости ED_{50} (HD_{50}) от длительности экспозиции τ в интервале примерно $10^{-13} < \tau < 10^{4}$ с, длины волны λ ($180 < \lambda < 10^{5}$ нм) и характеристического размера облучаемой области (диаметра лазерного пятна) – d (приблизительно $10^{-5} < d < 10^{-2}$ м). На первом этапе в качестве объектов облучения in vivo используют глаза лабораторных животных. В нашем случае это кролики пигментных пород (обычно – шиншилла серый) и затем в поверочном эксперименте – обезьяны (чаще всего макака резус).

Детальные экспериментальные исследования во всех указанных интервалах параметров – нереальная по объему задача. Поэтому методика состоит в поиске некоторых базовых зависимостей, например $ED_{50}(\tau)$ при фиксированных λ, d в доступном для имеющейся лазерной техники интервале τ. Затем на основе теоретических моделей и фрагментарных исследований $ED_{50}(\lambda, d)$ при фиксированных τ формируют общую картину $ED_{50}(\tau, \lambda, d)$. Далее, введя определенные коэффициенты гигиенического запаса η (опускаю подробности), рассчитывают ПДУ (МДЭ) как $E_{пду} = ED_{50}/\eta$ ($E_{мдэ} = ED_{50}/\eta$).

И в западных странах, и у нас было принято разрабатывать подобные нормативные документы в общедоступной форме, ориентируясь на пользователя с весьма умеренными анали-

d). Further, having entered certain coefficients of hygienic coefficients η (omitting details), PLI (MPE) is calculated as $E_{PLI} = ED_{50}/\eta$ ($E_{MPE} = ED_{50}/\eta$).

Both in the Western countries and here it was common to develop similar normative documents in accessible form, being guided by the user with very moderate analytical skills. Therefore the specified functional dependencies both for E_{PLI} and for E_{MPE} have been approximated to simple functions. These functions, in effect, have made standard basis. Where such similar approximations can lead will be demonstrated later.

Apparently, American standard ANSI Z-136.1–1976 American National Standard for the Safe Use of Lasers was the first detailed document of the state level devoted to the discussed problems. When developing this document, the results of the researches conducted not only in the USA, but also in countries of Western Europe (Great Britain, Germany, France, and Sweden) have been widely used. Experimental practices, principal and biological physics of the American standard are practically fully used when creating corresponding early IEC standards and their subsequent modifications. Therefore the data provided here with reference to ANSI Z-136 as the primary source, fully relate to the European standards (unless there is a corresponding note) and, naturally, to their Russian counterparts.

VISUAL SYSTEM TRANSMISSION SPECTRAL COEFFICIENTS

Tissues of anatomic elements of visual system of eyes contain about 90% of water with small variations. It defines spectral dependence of optical transmission of normal eye of the person (fig. 1) at the site from cornea to pigmental layer of retina (retinal pigmental epithelium – RPE). RPE contains melano-protein granules absorbing the main part of the visible

тическими способностями. Поэтому указанные функциональные зависимости и для $E_{пду}$, и для $E_{мдэ}$ аппроксимировали простыми функциями. Эти функции, в сущности, и составляли основу норматива. К чему приводят подобные аппроксимации, увидим ниже.

По-видимому, первым обстоятельным документом государственного уровня, посвященным обсуждаемой проблематике, был американский стандарт ANSI Z-136.1–1976 American National Standard for the Safe Use of Lasers. При разработке этого документа широко использовались результаты исследований, проведенных не только в США, но и в странах Западной Европы (Великобритании, Германии, Франции и Швеции). Физические и биологические основы американского стандарта наряду с экспериментальными наработками практически в полной мере использовались при создании соответствующих ранних стандартов IEC и их последующих модификаций. Поэтому данные, приведенные здесь со ссылкой на ANSI Z-136 как на первоисточник, в полной мере относятся к европейским нормативам (если нет соответствующей ремарки) и, естественно, к их российским дублям.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРОПУСКАНИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Ткани анатомических элементов зрительной системы глаза содержат с небольшими вариациями примерно 90% воды. Это определяет спектральную зависимость оптического пропускания нормального глаза человека (рис.1) на участке от роговицы до пигментного слоя сетчатки (ретинальный пигментный эпителий – РПЭ). РПЭ содержит мелано-протеиновые гранулы, поглощающие основную часть попавшего в глаз видимого излучения. именно этот участок повреждается в первую очередь, если облученность сетчатки превышает пороговое значение.

Излучение в интервалах $\lambda<350$ нм и $\lambda>1400$ нм поглощается преимущественно роговицей. Диапазон примерно 450–900 нм является наиболее опасным с позиций потенциального фотоповреждения тканей глаз. Здесь световой поток с малыми потерями фокусируется на сетчатку. В фокусе лазерного пучка при широком зрачке увеличение плотности мощности на отрезке роговица – сетчатка может достигать $(3–5)\cdot10^4$. Спектральные диапазоны 350–450 нм и 900–1400 нм переходные. Здесь

radiation entering the eye and is damaged first of all if irradiance of retina exceeds the threshold value.

Radiation in the intervals of $\lambda<350$ nm and $\lambda>1400$ nm is absorbed mainly by cornea. Range of about 450–900 nm is the most dangerous from the point of view of potential photodamage of tissues of eyes. Here the luminous flow with small losses is focused on retina. In the focus of laser beam when pupil is dilated, the increase of power density at the site of cornea – retina can reach $(3–5)\cdot10^4$. Spectral ranges of 350–450 nm and 900–1400 nm are intermediate. There is final probability of photodamage of both retina (with weakened radiation flow) and elements of structure of eyeball (iris, crystalline lens, vitreous body).

ANSI Z-136 standard contains simplified differentiation of degree of danger of laser radiation on spectral ranges. In the intervals of $180<\lambda<400$ nm and $\lambda>1400$ nm were defined during researches only by ED_{50} (QD_{50}) of photodamage of cornea, and then adequate values of MAE of radiation of eyes were established. In the range of $400<\lambda<1400$ nm (visible and near Infrared range), the MAE values were defined similarly, but, proceeding from conditions of photodamage of retina and adjacent structures, considering focusing of radiation flow by optical system of eye.

UV-RADIATION IMPACT ON THE EYES

Impact on cornea of powerful UV-radiation in the range from 180 to 300 nm (very approximately) causes deep changes of structure of tissues at the molecular level. These changes are close to those arising after ionizing radiation. Time of natural reparation is great therefore at repeated single or repeated radiation the effect of accumulation (summing) of the specified destructive changes is implemented. As a result (when energy (power) of radiation falling on cornea is less than MPE, single radiation by laser impulse of the considered duration of τ), the ANSI standard, and later SanPiN-91, establishes maximum permissible daily radiation doses irrespective of τ and quantity of impulses at their repetition. Strictly the term "exposition dose of photon radiation" (J/kg) means total energy of the photons absorbed by substance unit of mass for the fixed time interval. For simplification of metrological provision in the ANSI standard the total maximum permissible Q_{MPE} radiation energy passing through limited aperture is normalized whereas SanPiN-91 normalizes total power exposure on cornea H_{PLI}. Basic distinctions are not present here. The choice of units of measurement has been

существует конечная вероятность фотоповреждения как сетчатки (ослабленным потоком излучения), так и элементов структуры глазного яблока (радужка, хрусталик, стекловидное тело).

В стандарте ANSI Z-136 принята и сохранена до сегодняшнего дня в стандартах IEC упрощенная дифференциация степени опасности лазерного излучения по спектральным диапазонам. В интервалах $180<\lambda<400$ нм и $\lambda>1400$ нм в ходе исследований определялись исключительно $ED_{50}(QD_{50})$ фотоповреждения роговицы, а затем на этой основе устанавливались адекватные величины МДЭ облучения глаз. В интервале $400<\lambda<1400$ нм (видимый и ближний ИК-диапазон) значение МДЭ определялось аналогичным образом, но при этом учитывались условия фотоповреждения сетчатки и прилежащих структур и фокусировка потока излучения оптической системой глаза.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ГЛАЗА ИЗЛУЧЕНИЯ УФ-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Воздействие на роговицу мощного УФ-излучения в интервале от 180 до (очень приблизительно) 300 нм вызывает глубокие, на молекулярном уровне, изменения структуры тканей. Эти изменения по характеру близки измемнениям, возникающим при воздействии ионизирующей радиации. Время естественной репарации велико, поэтому при повторном однократном или многократном облучении реализуется эффект накопления

caused by the nomenclature and characteristics of the equipment for measurement of characteristics of laser radiation, widespread in the USSR during that period.

Action of UV-radiation on bio-tissue, including eye cornea, has been studied in the Soviet Union in rather wide scales. The results of these researches do not contradict to the standards established by the ANSI and IEC in spectral interval from 180 to ≈350 nm. Distinctions of the limit values of H_{PLI} recommended by the "Rules" and the corresponding Q_{MPE} values set by GOST IEC 60825-1-2013 (IEC 60825-1-2007) are minimal.

Certain disagreements have arisen when assessing the degree of danger of radiation impact on eyes in the range of 350–450 nm (see fig. 1). They will be considered further in section 5.

In the last decades, a number of photodestructive processes (in particular, mutagenicity) specific to impact of UV-radiation on bio-tissues has been investigated, not taken into account when developing the discussed documents. Therefore both the IEC standards, and equally SanPiN-91, in the part defining MPE (PLI) impact of UV-radiation on eyes need to be essentially perfected.

ACTION OF VISIBLE AND NEAR INFRARED RANGE RADIATION

ANSI, IEC standards

Fig. 2 shows basic dependence of threshold energy of laser radiation of visible and near Infrared range on exposure duration used in the first edition of the ANSI standard. Experimental animals were rhesus monkeys. The pupil is expanded medicamentally

(суммирования) наблюдаемых деструктивных изменений. Как следствие (в тех случаях, когда энергия или мощность падающего на роговицу излучения меньше МДЭ однократного облучения лазерным импульсом рассматриваемой длительности τ), в стандарте ANSI, а далее и в СанПиН-91, устанавливаются предельно допустимые *суточные дозы* излучения. Они не зависят от τ и количества импульсов при их повторении. Строго термин *"экспозиционная доза фотонного излучения"* (Дж/кг) подразумевает суммарную энергию фотонов, поглощенных единицей массы вещества за фиксированный интервал времени. Для облегчения метрологического обеспечения в стандарте ANSI нормируется суммарная предельно допустимая энергия излучения $Q_{мдэ}$, проходящая через ограниченную апертуру, тогда как в СанПиН-91 – суммарная энергетическая экспозиция на роговице $H_{пду.}$. Принципиальных различий здесь нет. Выбор единиц измерения был обусловлен номенклатурой и особенностями распространенной в СССР аппаратурой для измерения характеристик лазерного излучения.

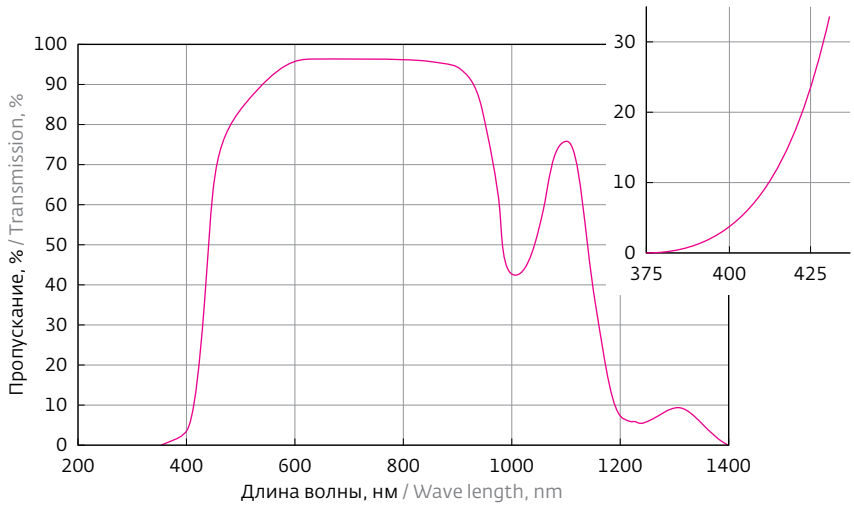

Рис.1. *Прямое пропускание интраокулярных структур на отрезке роговица – пигментный эпителий сетчатки (Geeraets W.J., 1968 [7])*
Fig. 1. *Direct transmission of intraocular structures on the site cornea – retinal pigmental epithelium (Geeraets W.J., 1968 [7])*

Действие УФ-радиации на биоткани, включая роговицу глаза, изучалось в Советском Союзе в достаточно широких масштабах. Результаты этих исследований не противоречат нормативам, установленным стандартами ANSI и позднее IEC в спектральном интервале от 180 до ≈350 нм. Различия предельных величин $H_{пду,}$ рекомендуемых "Правилами", и соответствующих значений $Q_{мдэ}$, заданных стандартом ГОСТ IEC 60825-1-2013 (IEC 60825-1-2007), минимальны.

Определенные разногласия возникли при оценке степени опасности воздействия на глаза излучения в интервале 350–450 нм (см. рис.1). Они будут рассмотрены далее.

В последние десятилетия исследован ряд фотодеструктивных процессов (в частности, мутагенность), специфичных для воздействия УФ-радиации на биоткани, не принятых во внимание при разработке обсуждаемых документов. Поэтому как стандарты IEC, так и в рав-

(mydriasis). It is supposed that diameter of laser beam is less than the diameter of eye pupil. Pulse energy Q (J) of the radiation entering pupil was measured. The technique of measurement of threshold power characteristics of laser radiation is suggested by E.S.Beatriss & G.D.Frish in 1973 [8]. It has been further developed, improved and used by many researchers, including in our country.

During experiment, the chosen site of eye bottom of animal has been irradiated with a series (usually a line from 7–10 impulses) of single impulses with step-by-step increase (reduction) in radiation energy between series. Through the set time interval (10 minutes and/or 1 hour) availability or absence of visible violations of structure is recorded in the alternative form "yes – no". The changes, for example, coagulate, is manifested in the form of gray spot on a rather dark background of retinal pigmental layer (RPE). For the ophthalmoscopy technique used at that period (fundus-camera, Retina Phot, non-reflex ophthalmoscope, slit lamp plus Goldman's lens) the spot with the diameter of 20–25 μm was a spot at least distinguishable against not uniformity of pigmentation of eye bottom. A range of radiation energies is selected so that a pointed series of radiations included both 100 percent absence of visible violations of structure of tissues of eye bottom and 100 percent availability. The received results were subjected to statistical analysis used for calculation of value of radiation energy QD_{50} causing ophthalmogically visible photodamage of tissues of

ной степени СанПиН-91 в части, определяющей МДЭ (ПДУ) воздействия УФ-излучения на глаза, нуждаются в существенной доработке.

ДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Стандарты ANSI, IEC

На рис.2 показана упоминавшаяся выше базовая зависимость пороговой энергии лазерного излучения видимого и ближнего ИК-диапазона от длительности экспозиции, использованная в первой редакции стандарта ANSI. Подопытные животные – обезьяны резус. Зрачок расширен медикаментозно (мидриаз). Подразумевается, что диаметр лазерного пучка меньше диаметра зрачка глаза. Измерялась энергия импульса Q (Дж) излучения, входящего в зрачок. Методика измерения пороговых энергетических характеристик лазерного излучения предложена E.S.Beatriss & G.D.Frish в 1973 году [8]. Впоследствии она была развита, доработана и использована многими исследователями, в том числе и в нашей стране.

В ходе эксперимента выбранный участок глазного дна животного облучался сериями (обычно – строчка из 7–10 импульсов) одиночных импульсов с пошаговым увеличением (уменьшением) энергии излучения от серии к серии. Через заданный интервал времени (10 минут и/или 1 час) в альтернативной форме "да"–"нет" фиксировалось наличие или отсутствие видимых нарушений структуры. Наличие изменений, например коагулят, проявлялось в виде серого пятна на относительно темном фоне пигментного слоя (РПЭ) сетчатки. Для используемой в тот период техники офтальмоскопирования (фундус-камера, ретинофот, безрефлексный офтальмоскоп, щелевая лампа плюс линза Голдмана) минимально различимым на фоне

eye bottom with confidence level of 50%. To receive one experimental point on the schedule presented on fig. 2, about 40–50 applications are required.

Naturally, in the following years these basic dependencies were replenished with new experimental data, including in picosecond interval τ [9]. Sources of errors of the measurements which have caused the seeming rise in threshold energy in the nanosecond range of exposure duration have been understood. Thus the approximations shown in fig. 2 for MPE have remained invariable till now (in the given interval τ) and have been successfully used in the IEC standards.

With all due respect for creators of experimental base and particularly ANSI Z136 standard, it is necessary to point some restrictions of use of the results presented in fig. 2. It shall be reminded that diameter of waist of the Gaussian beam focused by optical system of eye lies in the range from units to ≈10 μm (R.Gubisch, 1966; M.A.Ostrovskaya, 1969; G.I.Zheltov, 1989 et al [4]). The situation when extremely sharp focusing of laser radiation on retina is implemented is rather trivial. In this case an eye has to be accommodated to an object located (adjusted for chromatic aberration) slightly closer (farther) than the waist of initial Gaussian laser beam. In practice of operation of laser equipment in most cases it is an accommodation on the object located in the working room.

In the 70-80th years of the last century neither we, nor our colleagues in the Western Europe and in the USA had the technical means providing operating control of local fluctuations of pigmentation of tissues and at the same time space characteristics of laser beam within units of micrometers. The partial compensation of changes of refraction of eyes of laboratory animals under mydriasis (medicamentous dilation of pupil), as a rule, was used so that diameter of d of laser beam at the eye bottom had order of

неоднородностей пигментации глазного дна считалось пятно диаметром d_o=20–25 мкм.

Диапазон перестройки энергий излучения подбирался таким образом, чтобы серии облучений включали как 100%-ное отсутствие видимых нарушений структуры тканей глазного дна, так и их 100%-ное наличие. Комплекс полученных результатов подвергался статистической обработке, на основе которой вычислялось значение энергии QD_{50} излучения, вызывающего офтальмоскопически видимое фотоповреждение тканей глазного дна с доверительной вероятностью 50%. Для получения одной экспериментальной точки на графике, представленном на рис.2, требуется примерно 40–50 аппликаций.

Естественно, в последующие годы эти базовые зависимости пополнились новыми экспериментальными данными, в том числе в пикосекундном интервале τ [9]. Были поняты источники ошибок измерений, обусловивших кажущийся подъем пороговой энергии в наносекундном диапазоне длительностей экспозиций. При этом показанные на рис.2 аппроксимации для МДЭ остались неизменными до настоящего времени (в приведенном интервале τ) и благополучно перекочевали в стандарты IEC.

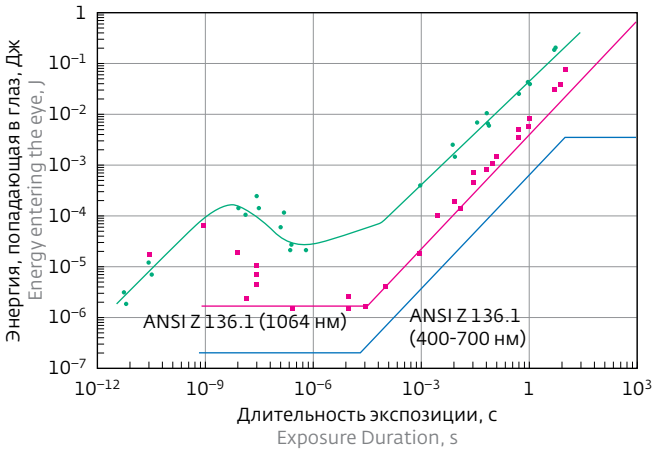

Рис.2. *Зависимости пороговой энергии излучения от длительности экспозиции для обезьян (резус) и соответствующие аппроксимации для ДПИ, установленные ANSI Z 136 (обозначения: кружки – λ=1064 нм, квадраты – видимый диапазон спектра. Публикуется из [3] с разрешения автора D.Sliney, 1982)*

Fig. 2. *The dependencies of threshold energy of radiation on exposure duration for monkeys (Rhesus) and the corresponding approximations MPR established by ANSI Z 136 (designations: circles – λ = 1064 nm, squares – visible range; published from [3] with the permission of the author D.Sliney, 1982)*

При всем глубочайшем уважении к создателям экспериментальной базы и собственно стандарта ANSI Z 136 надо указать на некоторые ограничения использования результатов, представленных на рис.2. Напомню, что диаметр перетяжки гауссового пучка, сфокусированного оптической системой глаза, лежит в интервале от единиц до ≈10 мкм (R.Gubisch, 1966; М.А.Островская, 1969; Г.И.Желтов, 1989 и многие другие [4]). Ситуация, при которой реализуется предельно острая фокусировка лазерного излучения на сетчатку, достаточно тривиальна. В этом случае глаз должен быть аккомодирован на предмет, расположенный (с поправкой на хроматическую аберрацию) несколько ближе (дальше) перетяжки исходного гауссова лазерного пучка. В практике эксплуатации лазерной аппаратуры это в большинстве случаев аккомодация на предметы, расположенные внутри рабочего помещения.

В 70–80-х годах прошлого века ни мы, ни наши коллеги на Западе и в США не располагали техническими средствами, обеспечивающими оперативный контроль локальных флюктуаций пигментации тканей и одновременно

50–80 μm. In the specified interval of the sizes of the irradiated area local fluctuations of optical density of retinal pigmental epithelium were automatically averaged, and the zone of destruction of tissues (above-mentioned gray spot with a diameter of 20–25 μm) with small error corresponded to maxim of the power density (energy) of laser beam in the axial area.

Later we have shown (fig. 4) that basic experimental data about the dependency of threshold energy of laser photodestruction of tissues of eye bottom due to exposure duration recorded in fig. 2 are adequate to diameter of the laser beam focused on retina in the interval (50–80 μm) stated above.

The minimum diameter of distribution of irradiance of retina on the exp (–1) level at direct radiation of pupil with the Gaussian beam of visible range has order of 10 microns [4]. The size of threshold energy of photodamage of retina Q_{MPL} (Q_{MAE}) in the first approximation is proportional to square of the irradiated area of pigmental epithelium RPE, or, otherwise, ~ d^2. Thus, there are serious bases for the statement that the impulse of laser radiation, with the energy positioned as threshold energy in fig. 2 with sharp

пространственных характеристик лазерного пучка с точностью до единиц микрометров. В эксперименте, как правило, использовалась частичная компенсация изменений рефракции глаз лабораторных животных при мидриазе (медикаментозном расширении зрачка) таким образом, чтобы диаметр d лазерного пучка на глазном дне имел порядок 50–80 мкм. В указанном интервале размеров облучаемой области локальные флюктуации оптической плотности пигментного эпителия сетчатки автоматически усреднялись, а зона деструкции тканей (упоминавшееся серое пятно диаметром 20–25 мкм) с небольшой погрешностью соответствовала максиму плотности мощности (энергии) лазерного пучка в приосевой области.

Позже нами было показано (рис.3), что базовые экспериментальные данные о зависимости пороговой энергии лазерной фотодеструкции тканей глазного дна от длительности экспозиции, зафиксированные на рис.2, адекватны диаметру сфокусированного на сетчатку лазерного пучка в указанном выше интервале (50–80 мкм).

focusing (d ≈10 μm) *will lead to serious injury of retina with probability of 100%*.

These notes were repeatedly published, discussed both open and private at the different conferences. The main counterarguments were low probability of event of extremely sharp focusing of beam on retina and availability of large (about 10) hygienic coefficient η upon transition from threshold energy of radiation of QD_{50} to Q_{MPE}. There were no objections on the essence of problem. Actually the problem is live and is still acute.

First domestic standards

The researches of mechanisms of destructive action of powerful optical radiation on different bio-objects (primarily, tissue of eyes) were conducted in the USSR in wide scales practically after the birth of lasers. It is worth mentioning that the first-ever industrial medical device for laser ophthalmologic surgery (ophthalmologic coagulator) has been released in the USSR in 1962. One of first-ever laser operation, laid the foundation not only for ophthalmologic, but also for laser surgery in general, has been carried out at the scientific research institute of eye diseases and tissue therapy named after V.P.Filatov, Odessa (hereinafter

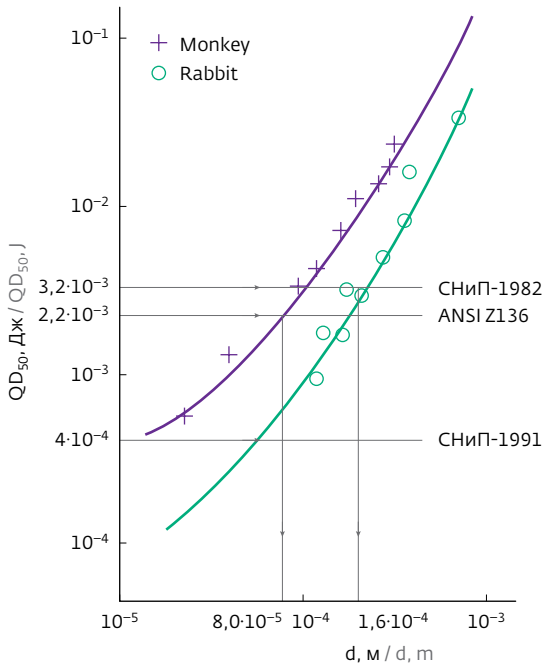

Рис.3. *Базовая зависимость QD50(τ) для Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров №2392-81(длина волны 1064 нм, диаметр пятна на сетчатке d ≈150 мкм, подопытные животные – кролики шиншилла серый; разным символам соответствуют серии измерений, проведенных в разное время)*

Fig. 3. *Basic dependency of QD50 (τ) for Sanitary standards and rules of the arrangement and operation of lasers No. 2392–81 (λ = 1064 nanometers, diameter of spot on retina of d is ≈150 microns, experimental animals – rabbits chinchilla gray; different symbols are correlated with the results of series of measurements taken at different times)*

Минимальный диаметр распределения облученности сетчатки по уровню exp(–1) при прямом облучении зрачка Гауссовым пучком видимого диапазона спектра, как упоминалось, имеет порядок 10 мкм [4]. Величина пороговой энергии фотоповреждения сетчатки $Q_{пду}(Q_{мдэ})$ в первом приближении пропорциональна квадрату облучаемой площади пигментного эпителия РПЭ или, иными словами, $\approx d^2$. Таким образом, имеются серьезные основания для утверждения, что импульс лазерного излучения с энергией, позиционируемой как пороговая на рис.2, при острой фокусировке (d ≈ 10 мкм) *приведет к серьезной травме сетчатки с вероятностью 100%*.

Эти замечания неоднократно публиковались, обсуждались и открыто, и приватно на различных конференциях. Основные кон-

referred to as Filatov Scientific Research Institute) in October, 1962. The doctor who has carried out it (later becoming professor) L.A.Linnik has been awarded the corresponding certificate of the American society of ophthalmologists.

To the middle of the 80th, efforts of number of the organizations of medical and biophysical profiles have accumulated rather extensive experimental material and theoretical models of both destructive and therapeutic action of laser radiation on live objects. The conditions of safe operation of laser technology were dictated by local rules, methodical recommendations and specifications.

The priority of development of the domestic normative document on laser safety of nation-wide level, certainly, belongs to the creative union of the State Optical Institute named after S.I.Vavilov (Russian abbreviation is GOI) and Department of Ophthalmology of Military-Medical Academy named after S.M.Kirov (MMA). During this work, the data of domestic and foreign works on the discussed problem have been generalized and own pilot studies on animals in rather large volume have been conducted.

The laser unique for that period developed and made in GOI has been used in the experiment providing control of exposure duration in the interval of 10^{-10}–10^{-1} sec. During researches methodical recommendations have been created and programs of statistical processing of experimental data have been improved. A number of priority results has been received when studying mechanisms of destructive action on bio-tissue supershort (about 10^{-10} s) radiant pulses, and in some other areas close to the discussed subject. The development of the first domestic Sanitary rules and regulations for design and operation of lasers No. 2392–81 was completed in 1981 (hereinafter referred to as the SanPiN-81) which was one of the final achievements of great practical value

The basic dependence of QD_{50} (τ), used when developing the specified document, is shown in fig. 3. The results of experiments are certainly reliable. Here, unlike the data provided in fig. 2, all measurements are executed on one laser installation having stable space characteristics of radiation flow, not depending on exposure duration. The researches have been conducted by uniform technique of the same group of researchers (the subjective factor is excluded). Thus the animals of one genetic line kept in identical conditions have been used. These results have persistent value as a contribution to the general base of experimental

траргументы против этих утверждений – низкая вероятность события создания предельно острой фокусировки пучка на сетчатке и наличие большого (порядка 10) коэффициента гигиенического запаса η при переходе от пороговой энергии излучения QD_{50} к $Q_{мдэ}$. Возражений по существу проблемы не было. Собственно проблема жива и здравствует по-прежнему.

Первые отечественные нормативы

Исследования механизмов деструктивного действия мощного оптического излучения на различные биообъекты (на ткани глаз в первую очередь) велись в СССР в широких масштабах практически вслед за рождением лазеров. Уместно вспомнить, что первый в мире промышленный медицинский аппарат для лазерной офтальмохирургии (офтальмокоагулятор) был выпущен в СССР в 1962 году. Одна из первых в мире лазерная операция, положившая начало не только офтальмо-, но и лазерной хирургии вообще, была проведена в НИИ глазных болезней и тканевой терапии им. В.П.Филатова, Одесса (далее – НИИ Филатова) в октябре 1962 года. Проводивший ее доктор (впоследствии профессор) Л.А.Линник был удостоен соответствующего сертификата Американского общества офтальмологов.

К середине 80-х годов усилиями ряда организаций медицинского и биофизического профилей был накоплен достаточно обширный экспериментальный материал и разработаны теоретические модели как деструктивного, так

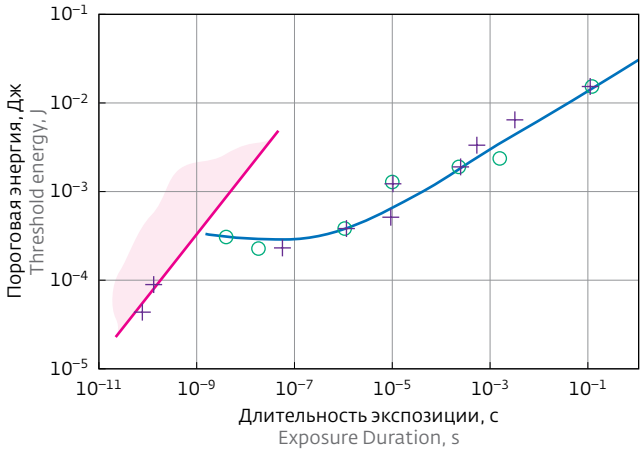

Рис.4. *Зависимость пороговой энергии излучения от диаметра облучаемой области сетчатки(длина волны λ=1064 нм, длительность импульса τ=2·10⁻³ с; сплошная кривая соответствует расчетным значениям)*

Fig. 4. *Dependency of threshold energy of radiation on diameter of the irradiated retina area (λ=1064 nanometers, τ=2·10⁻³ s; continuous curve corresponds to design values)*

data about destructive action of laser radiation on eye retina.

Unfortunately, similarly to the data of American and Western European colleagues (fig. 2), provided dependencies have restrictions of applicability for PLI assessment. These restrictions are caused by rather large magnitude of diameter of the retina area irradiated during experiment (d≈150 μm). As apparent from comparison of dependency of QD_{50} (τ)

и терапевтического действия лазерного излучения на живые объекты. Условия безопасной эксплуатации лазерной техники диктовались локальными правилами, методическими рекомендациями и техническими условиями.

Приоритет разработки отечественного нормативного документа по лазерной безопасности общегосударственного уровня, безусловно, принадлежит творческому союзу Государственного оптического института им.С.И.Вавилова (ГОИ) и кафедры офтальмологии Военно-медицинской академии им.С.М.Кирова (ВМА). В ходе этой работы были обобщены данные отечественных и зарубежных достижений в области обсуждаемой проблемы и проведены собственные экспериментальные исследования на животных в достаточно большом объеме.

В эксперименте применен уникальный на тот период лазер, разработанный и изготовленный в ГОИ, обеспечивающий управление длительностью экспозиции в интервале 10^{-10}–10^{-1} с. В ходе исследований были созданы методические рекомендации и усовершенствованы программы статистической обработки экспериментальных данных. Получен набор приоритетных результатов как при изучении механизмов деструктивного действия на биоткани сверхкоротких (порядка 10^{-10} с) импульсов излучения, так и в ряде других областей, близких к обсуждаемой тематике. Одним из итоговых достижений, имевших большое практическое значение, была завершенная в 1981 году разработка первых отечественных Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров № 2392–81 (далее – СанПиН-81)

Базовая зависимость $QD_{50}(\tau)$, использованная при разработке указанного документа показана на рис.3. Результаты экспериментов, безусловно, надежны. Здесь, в отличие от данных, приведенных на рис.2, все измерения выполнены на одной лазерной установке, имеющей стабильные, не зависящие от длительности экспозиции пространственные характеристики потока излучения. Исследования проведены по единой методике одной и той же группой исследователей (исключается субъективный фактор). При этом использовались животные одной генетической линии, содержащиеся в одинаковых условиях. Эти результаты имеют непреходящее значение как вклад в общую базу экспериментальных данных о деструктивном

presented in fig. 2 and 3, the increase (reduction) in d leads to changes not only of QD_{50} value itself, but also to serious "deformations' of nature of dependency of QD_{50} on exposure duration τ.

It is obvious that with correct problem definition basic dependency of threshold energy (or other threshold power radiation characteristics) on exposure duration have to be adequate to the conditions extremely dangerous from positions of potential photodamage of the irradiated object. Neither ANSI and IEC standards, nor domestic SanPiN-81 meet this requirement, unfortunately.

Rules and regulations for design and operation of lasers No. 5804-91 (SanPiN-91)

Guidelines for laser safety of the second generation were developed in our country in the late nineties within the extensive and many-sided State program devoted to safety of the personnel when operating laser technology practically in all spheres of application (science, industry, medicine, army, etc.). The list of problems from biophysical bases of interaction of laser radiation with live objects to potential occupational diseases and technical (metrological) control in the workplaces has been considered. The program had no world analogs as for depth of study and the list in coordination the solved tasks until today, I believe.

About 10 organizations have participated in performance of task according to the section of the Maximum Permissible Levels of Radiation of Eyes and Skin Program. Pilot studies on animals (rabbits) were conducted by tandems GOI-MMA, Institute of biophysics – Central Research Institute TOCHMASH, Institute of physics (IF) NAS of Belarus – V.P.Filatov's Scientific Research Institute. Experiments on apes have been carried out by the latter organizations on the basis of Scientific Research Institute of Experimental Pathology and Therapy (Scientific Research Institute EPIT, Nursery for monkeys, Sukhumi) with the involvement of specialists from lead establishments of the USSR of medical and biophysical profiles. The amount of financing has provided not only carrying out pilot studies (including field), but also creation of the special equipment including lasers with control of exposure duration and spectral distribution of radiation, system of transport and targeting of radiation flows during the experiments on animals and some other.

The initial concept of new edition of SanPiN-91 was a product of collective discussion of the participating organizations, including, certainly, SanPiN-81 developers. The main point in this concept was

действии лазерного излучения на сетчатку глаза.

К сожалению, аналогично данным американских и западноевропейских коллег (рис.2), представленные зависимости имеют ограничения применимости для оценки ПДУ. Эти ограничения обусловливаются достаточно большой величиной диаметра облучаемой в эксперименте области сетчатки (здесь d≈150 мкм). Как видно из сопоставления зависимостей $QD_{50}(\tau)$, представленных на рис.2 и 3, увеличение (уменьшение) d приводит к изменениям не только собственно значений QD_{50}, но и к серьезным "деформациям" характера зависимости QD_{50} от длительности экспозиции τ.

Очевидно, что при корректной постановке задачи базовые зависимости пороговой энергии (или иных пороговых энергетических характеристик излучения) от длительности экспозиции должны быть адекватны условиям, предельно опасным с позиций потенциального фотоповреждения облучаемого объекта. Ни стандарты ANSI и IEC, ни отечественные СанПиН-81 этому требованию, к сожалению, не удовлетворяют.

the creation of basic dependence of ED_{50} (QD_{50}) on exposure duration for conditions of the most adverse accommodation of eyes (extremely "sharp" focusing of radiation flow on eye bottom). As noted above, we had no the technical means to provide operating control of primary, small photodamages of retina directly when carrying out experiments. However, by the beginning of the project the experimental and analytical technique of measurement of dependence of ED_{50} (QD_{50}) on diameter of laser spot at eye bottom has already been developed and approved [4]. Diameter of spot of d varied in limits available within measurement limits (~40–500 μm). The size of the threshold power characteristic for d=10 μm was calculated by extrapolation method.

In order to illustrate the method, the results of experiments on measurement of QD_{50} during radiation of eye bottom of monkeys and rabbits by the laser with the wavelength of 1,064 μm at pulse width of $2\cdot10^{-3}$ s are given in fig. 4. By the results of all measurements given in fig. 4 only one (!) point on graphics of basic dependence of $QD_{50}(\tau)$, corresponding to λ=1064 nm, $\tau=2\cdot10^{-3}$ is received ($QD_{50}=4\cdot10^{-4}$ J). It shall be mentioned that 6 large rhesus monkeys from

Нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров №5804-91 (СанПиН-91)

Нормативы по лазерной безопасности второго поколения разрабатывались в нашей стране в конце 90-х годов в рамках обширной и многогранной Государственной программы, посвященной обеспечению безопасности персонала при эксплуатации лазерной техники практически во всех сферах ее применения (наука, промышленность, медицина, армия и т.д.). Рассматривался широкий перечень проблем – от биофизических основ взаимодействия лазерного излучения с живыми объектами до потенциальных профессиональных заболеваний и технического (метрологического) обеспечения контроля на рабочих местах. Программа по глубине проработки и перечню согласованно решаемых задач не имела и, думаю, не имеет до настоящего времени мировых аналогов.

В выполнении задания по разделу Программы "Предельно допустимые уровни облучения глаз и кожи" участвовало порядка 10 организаций. Экспериментальные исследования на животных (кроликах) проводили тандемы ГОИ –ВМА, Институт биофизики МЗ – ЦНИИ ТОЧМАШ, ИФ НАН Беларуси – НИИ В.П.Филатова. Эксперименты на приматах выполняла последняя пара организаций на базе НИИ экспериментальной патологии и терапии (НИИ ЭПиТ, Питомник обезьян, г. Сухуми) с приглашением специалистов из ведущих учреждений СССР медицинского и биофизического профилей. Объем финансирования обеспечил не только проведение экспериментальных исследований (в том числе на выезде), но и создание специальной аппаратуры, включающей лазеры с перестройкой длительности экспозиции и спектрального состава излучения, системы транспорта и наведения потоков излучения в экспериментах на животных и ряд других.

Исходная концепция новой редакции СанПиН-91 – продукт коллективного обсуждения организаций-участников, включая, безусловно, разработчиков СанПин-81. Основной пункт в этой концепции – создание базовой зависимости $ED_{50}(QD_{50})$ от длительности экспозиции для условий наиболее неблагоприятной аккомодации глаз (предельно "острой" фокусировки потока излучения на глазное дно). Как отмечено выше, мы не располагали техническими средствами, обеспечивающими оперативный

one litter were used in the experiment for obtaining information (fig. 4), weighing 6–8 kg. It is necessary to add, about, 10 rabbits. It shall be reminded that for obtaining similar information by the technique (fig. 2 and 3) common for that period, there were enough 40–50 laser applications in one eye of one animal. Thus, adoption of the concept about the most adverse accommodation demanded essential increase in volume of researches and, respectively, expenses. And, nevertheless, this concept has been accepted.

To end up with the discussion about expediency of adoption of the specified concept, there was information about recording by ophthalmologists of multiple dot scotomas (coagulates) in paramacular area of retina of eyes among the persons professionally involved in adjustment of the gas lasers using the collimator method increasing during that period. It was helium-neon laser which power was significantly lower than MPE established by the IEC standard.

When discussing the concept, the practical value of unification of domestic guidelines with foreign standards was considered for sure. The priority by degree of the importance has been given to care of human health. The results received in the course of pilot studies rather well fitted into the database which is available for that period created by domestic and foreign colleagues. Fig. 4 shows the results of QD_{50} measurements taken directly from schedules in fig. 2 and 3 for $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$ s. These data are adequate to values of diameters of laser spot at eye bottom in the first case to the predicted $d = (5–8) \cdot 10^{-5}$ m, in the second measured $d = (15–16) \cdot 10^{-5}$ m. The fact that the basic QD_{50} values received in the assumption of the most adverse condition of accommodation of eye were about 5 times lower than those used in the ANSI and IEC standards is prominent (fig. 4).

Fig. 5 shows the fragment of the resulting dependency HI_{PLI} (H_{MPE}) on exposure duration. As a result of difference of the approaches considered above, H_{MPL} is by 3–10 times lower for different conditions of radiation of eyes than H_{MPE}. These variations are partly caused by choice of size of coefficient of hygienic reserve η by the developers of the ANSI and IEC standards. This choice is not discussed in the comments to this standard known to me.

The main definitions of classes of danger of lasers in SanPiN-91 and IEC standards are close. However, the established maximum permissible power parameters for lasers of the 1, 2 and 3 classes differ adequately to the distinctions of PLI – MPE. Both considered documents, as it was noted, are oriented to simplification of their use by means of approximation of real, sufficiently "soft" dependency of ED_{50} (τ) (fig.

контроль первичных, малых фотоповреждений сетчатки непосредственно при проведении эксперимента. Однако к началу проекта уже была разработана и опробована экспериментально-аналитическая методика измерения зависимости $ED_{50}(QD_{50})$ от диаметра лазерного пятна на глазном дне [4]. Диаметр пятна d варьировался в доступных для измерений пределах (~40–500 мкм). Величина пороговой энергетической характеристики для d = 10 мкм вычислялась методом экстраполяции.

Для иллюстрации метода на рис.3 приведены результаты экспериментов по измерению QD_{50} при облучении глазного дна обезьян и кроликов лазером с длиной волны 1,064 мкм при длительности импульса $2 \cdot 10^{-3}$ с. По результатам всех измерений, приведенных на рис.3, получена только одна (!) точка на графике базовой зависимости QD_{50} (τ), соответствующая λ = 1064 нм, $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$ ($QD_{50} = 4 \cdot 10^{-4}$ Дж). Замечу в порядке примечания, что для получения информации (рис.3) в эксперименте использовано 6 крупных обезьян – резус, весом 6–8 кг, одного помета. К этому нужно добавить примерно 10 кроликов. Вспомним, что для получе-

2, 3) on linear symmetric or power functions. Thus in places of "breaks' of approximations (intervals of 10^{-5}–10^{-3} and 10^{-10}–10^{-8} s), the size of hygienic coefficient is artificially increased, approximately, by 3–5 times without physically and physiologically reasonable necessity.

Example of solution of specific problem based on GOST IEC

As example of application of the IEC standard, we will consider a simple problem about choice of limit power of two laser pointers with lengths of waves of radiation of 534 and 640 nanometers. Let's be guided by the possibility of natural protection of eyes at direct laser irradiation on the basis of unconditional blink reflex with characteristic delay time of t = 0,25 s (the 2nd class of danger in accordance with GOST IEC). According to this standard (Table A1), MAE of radiation in spectral interval of 500–700 nanometers with exposure from 10^{-3} to 10 s is defined by ratio of $H_{MAE} = 18 \cdot t^{0,75}$ J/m^2. Therefore (as is easily shown) the power of lasers, safe for the eyes used in pointers should not exceed, about, 1 mW (10^{-3} W). It belongs to radiation with lengths of waves both of 534 and 640 nm.

ния подобной информации по традиционной на тот период методике (рис.2 и 4) было достаточно 40–50 лазерных аппликаций в одном глазике одного животного. Таким образом, принятие концепции о наиболее неблагоприятной аккомодации требовало существенного увеличения объема исследований и, соответственно, затрат. И тем не менее эта концепция была принята.

Заключительным аккордом дискуссии о целесообразности принятия указанной концепции послужила информация о фиксации офтальмологами множественных точечных скотом (коагулятов) в парамакулярной области сетчатки глаз у лиц, профессионально связанных с юстировкой газовых лазеров, использующих распространенный в тот период коллиматорный метод. Речь шла о гелий-неоновых лазерах, мощность которых была существенно ниже МДЭ, установленного стандартом IEC.

При обсуждении концепции, разумеется, учитывалась практическая ценность унификации отечественных нормативов с зарубежными стандартами. Приоритет по степени значимости был отдан заботе о здоровье людей. Полученные в процессе экспериментальных исследований результаты достаточно хорошо вписывались в имеющуюся на тот период базу данных, созданную отечественными и зарубежными коллегами. На рис.3 показаны результаты измерений QD_{50}, взятые непосредственно из графиков на рис.2 и 4 для $\tau = 2 \cdot 10^{-3}$ с. Эти данные адекватны значениям диаметров лазерного пятна на глазном дне в первом случае предсказанному $d = (5–8) \cdot 10^{-5}$ м, во втором – измеренному $d = (15–16) \cdot 10^{-5}$ м. Констатируем тот факт, что базовые значения QD_{50}, полученные в предположении о наиболее неблагоприятном состоянии аккомодации глаза, оказались *примерно в 5 раз ниже тех*, что использованы в стандартах ANSI и IEC (рис.3).

На рис.5 показан фрагмент результирующих зависимостей $H_{пду}(H_{мдэ})$ от длительности экспозиции. Как следствие разности подходов, рассмотренных выше, $H_{пду}$ в 3–10 раз ниже $H_{мдэ}$ для различных условий облучения глаз. Эти вариации отчасти обусловлены выбором величины гигиенического коэффициента запаса η разработчиками стандартов ANSI и IEC. Этот выбор в известных мне комментариях к этому стандарту не обсуждается.

Основные определения классов опасности лазеров в СанПиН-91 и стандарте IEC близки. Однако,

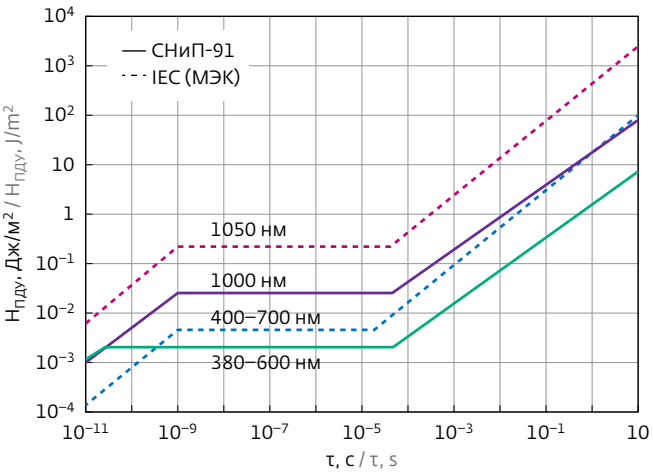

Рис.5. *Предельно допустимые энергетические экспозиции прямого облучения глаз потоками лазерного излучения: согласно СанПиН-91 – сплошные кривые; согласно стандарту IES 60825–1:2007 (ГОСТ IEC 60825-1-2013 – пунктирные кривые*

Fig. 5. *Maximum permissible power exposures of direct radiation of eyes by the flows of laser radiation: according to SanPiN-91 – continuous curves; according to IES 60825–1:2007 (GOST IEC 60825–1–2013) – dotted curves*

From positions of modern ideas of action of laser radiation on eyes, both the calculation procedure and the end result essentially have 3 serious mistakes. In particular, as it was noted above, the basic principle of the IEC standard is the assumption of focusing of flow of laser radiation on retina in a spot with a diameter of 50–70 μm. Such size of spot is characteristic for eyes of the person with violation of refraction of 0,5–1 dioptries who has forgotten to put on glasses and meditatively looking into the distance. Possibility of extremely sharp focusing of radiation, for example, when using laser pointer in rather small rooms is certainly real. In this case accidental entrance in the eye of a person with 1 mW of laser radiation is injury-causing.

Second factor is as follows. Laser radiation in green spectral range (here – 534 nanometers) is unambiguously more dangerous to eyes, than in red one. It is caused by that the absorption index of the melanin defining spectral properties of retinal pigment epithelium is, approximately, twice higher for λ = 534 nanometers, than for λ = 640 nanometers. With radiation absorption by tissues (with other things being equal) the speed of heating of the environment adequately increases and the speed of denaturation of proteins of cells of pigment epithelium increases significantly. In the absence

установленные предельно допустимые энергетические параметры для лазеров 1, 2 и 3-го классов отличаются адекватно различиям ПДУ – МДЭ.

Оба рассматриваемых документа, как отмечалось, ориентированы на упрощение их использования посредством аппроксимации реальной, достаточно "мягкой" зависимости $ED_{50}(\tau)$ (рис.2, 4) простыми линейными или степенными функциями. При этом в местах "изломов" аппроксимаций (здесь интервалы 10^{-5}–10^{-3} и 10^{-10}–10^{-8} с) величина гигиенического коэффициента запаса искусственно увеличена примерно в 3–5 раз без физически и физиологически обоснованной необходимости.

Пример решения конкретной задачи на основе ГОСТ IEC

В качестве примера применения стандарта IEC рассмотрим простую задачу о выборе предельной мощности двух лазерных указок с длинами волн излучения 534 и 640 нм. Будем ориентироваться на возможность естественной защиты глаз при прямом облучении лазером на основе мигательного рефлекса с характерным временем запаздывания t = 0,25 с (2 класс опасности

of information on position of the developers of the IEC standard equally probable two mistakes are represented. If rated value of MPE was assumed safe for radiation in green area of range, the hygienic coefficient η around 600–700 nanometers is unfairly overestimated by several times. Otherwise the probability of photodamage of eyes of the persons by pointer radiation λ = 534 nanometers additionally increases.

And the third important circumstance which is also important. It is necessary to remember that time of protective blink reflex (0,15–0,25 s) when developing the ANSI standard has been defined under conditions of impact of the powerful, bright flash of white light adequate to nuclear explosion or analogs [3]. Similar serious researches of reaction of eyes to specific laser influence are unknown to me. The main radical differences from the specified conditions are caused by laser (monochromatic) exposure of small (in the extreme case measured by tens of μm) retina sites. From experience of my colleagues (in rare instances negative), the influence of visible laser radiation in particular on peripheral departments of retina does not cause feeling of discomfort. Apparently, it is possible to explain spot paramacular injuries of retina

по ГОСТ IEC). Согласно этому стандарту (Таблица А1 документа), МДЭ излучения в спектральном интервале 500–700 нм при длительности экспозиции от 10^{-3} до 10 с определяется соотношением $H_{мдэ}=18\cdot t^{0,75}$ Дж/м^2. Откуда легко показать, что безопасная для глаз мощность лазеров, используемых в указках, не должна превышать, примерно, 1 мВт. Это относится к излучению с длинами волн как 534, так и 640 нм.

С позиций современных представлений о действии лазерного излучения на глаза, как процедура расчета, так и конечный результат имеют в основе три серьезные ошибки. В частности, как отмечалось выше, базовым принципом норматива IEC является предположение о фокусировке потока лазерного излучения на сетчатку в пятно диаметром 50–70 мкм. Такой размер пятна характерен для глаз человека с нарушением рефракции 0,5–1 диоптрии, забывшего надеть очки и задумчиво взирающего в бесконечность. Возможность предельно острой фокусировки излучения, например, при использовании лазерной указки в относительно небольших помещениях, безусловно, реальна. В этом случае случайное попадание в глаз слушателя лазерного излучения мощностью 1 мВт травмоопасно.

Второй фактор. Лазерное излучение в зеленой области спектра (здесь – 534 нм) однозначно более опасно для глаз, чем в красной. Это обусловлено тем, что показатель поглощения меланина, определяющего спектральные свойства пигментного эпителия сетчатки примерно в два раза выше для $\lambda=534$ нм, чем для $\lambda=640$ нм. При поглощении излучения тканями адекватно возрастает (при прочих равных условиях) скорость нагрева среды и существенно увеличивается скорость денатурации протеинов клеток пигментного эпителия. При отсутствии информации о позиции разработчиков стандарта IEC равновероятными представляются две ошибки. Если нормированное значение МДЭ предполагалось безопасным для излучения в зеленой области спектра, гигиенический коэффициент запаса η в районе 600–700 нм неоправданно завышен в несколько раз. В противном случае вероятность фотоповреждения глаз слушателей излучением указки $\lambda=534$ нм дополнительно возрастает.

И третье, на наш взгляд, немаловажное обстоятельство. Необходимо вспомнить, что время защитного мигательного рефлекса (0,15–0,25 с) при разработке стандарта ANSI было mentioned above among adjusters of gas lasers by the absence of unconditioned blink reflex upon influence of collimated flow of laser radiation. Obviously, the considered problem deserves detailed studying, and the concept of "natural protective reaction" in relation to impact of the laser on eyes shall be specified.

Example of solution of specific problem based on SanPiN-91

Omitting calculation parts, we will provide final recommendations of SanPiN-91 for the limit power of lasers in the conditions considered above. They are as follows: $P_{PLI}(\lambda=534\ nm)=10^{-4}$ W; $P_{PLI}(\lambda=640\ nm)=2\cdot10^{-4}$ W. They consider the possibility of "sharp" focusing of radiation flow on retina, and distinction in degree of danger of radiation for two spectral ranges is mitigated. Time of blink reflex (with heavy consciousness of own powerlessness in an attempt to offer something best) is left similar, as accepted in the ANSI (IEC).

SPECTRAL INTERVALS OF 350–450 AND 900–1400 NM

IEC standard

With the distribution of flow of laser radiation in the eyeball two processes are completed: on the one hand, increase in power density (irradiance of environment E, W/m^2), caused by focusing, and on the other hand, the reduction of this value determined by spectral absorption index of k (λ), m^{-1}. In the visible spectral range the k is not enough, and in essence the action of this factor is ignored. In near UV and Infrared ranges where values of k are about, 10^{-1}–10^{-3} m^{-1}, such ignoring is inadmissible. Depending on ratio of the specified factors, the action of laser radiation can be dangerous not only for cornea and/or retina of the eye, but also for intermediate intraocular structures, such as iris, crystalline lens, vitreous body. Pathogenic action of such radiation on eyes is, for example, an occupational disease common both in our country and in the western world [3], namely beam cataract, both among glass blowers (UV-background), and among the employees of hot workshops in metallurgy, forge masterful, etc. (IR-background).

In ANSI Z136 and IEC standards these factors are not considered. Apparently, even when developing the concept of the American standard, it was decided to define a border of visible and UV-range on a wavelength of $\lambda=400$ nanometers. The subsequent aspiration to simplify the use of the standard has led to an assumption that laser radiation with wavelength $\lambda>400$ nanometers are dangerous only to

определено при условиях воздействия мощной, яркой вспышки белого света, адекватной атомному взрыву или аналогам [3]. Аналогичные, серьезные исследования реакции глаз на специфическое лазерное воздействие мне не известны. Основные коренные отличия от указанных условий обусловлены лазерным (монохроматическим) облучением малых участков сетчатки (в предельном случае, измеряемом в десятках микрометров). По опыту коллег (в отдельных случаях печальному) воздействие видимого лазерного излучения в особенности на периферические отделы сетчатки не вызывает ощущения дискомфорта. Отсутствием безусловного мигательного рефлекса на воздействие коллимированного потока лазерного излучения, по-видимому, можно объяснить упомянутые выше точечные парамакулярные травмы сетчатки у юстировщиков газовых лазеров. Очевидно, рассматриваемая проблема заслуживает обстоятельного изучения, а понятие "естественная защитная реакция" применительно к воздействию лазера на глаза требует уточнения.

Пример решения конкретной задачи на основе СанПиН-91

Опуская детали расчета, приведем конечные рекомендации СанПиН-91 для предельной мощности лазеров в условиях, рассмотренных выше. Они следующие: $P_{пду}(\lambda = 534$ нм$) = 10^{-4}$ Вт; $P_{пду}(\lambda = 640$ нм$) = 2 \cdot 10^{-4}$ Вт. Здесь учтена возможность "острой" фокусировки потока излучения на сетчатку и смягчено различие в степени опасности излучения для двух областей спектра. Время мигательного рефлекса (с тяжелым сознанием собственного бессилия в попытке предложить что-то лучшее) оставлено аналогичным, принятому в ANSI (IEC).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ 350–450 И 900–1400 нм

Стандарт IEC

При распространении потока лазерного излучения внутри глазного яблока конкурируют два процесса: с одной стороны, увеличение плотности мощности (облученности среды E, Вт/м^2), обусловленное фокусировкой, и с другой, уменьшение этой величины, определяемое спектральным показателем поглощения k(λ), м$^{-1}$. В видимой области спектра k мало, и действием этого фактора по существу пренебрегают. В ближних УФ- и ИК-диапазонах, где значения

retina. Respectively, with λ <400 potential possibility of photodamage of cornea only is considered.

For the illustration of "operation" of this assumption we will consider the values of H_{MPE} (J/m^2) taken at a rough estimate from the last edition of the state standard specification IEC 60825-1-2013 for $\lambda = 400 \pm \Delta\lambda$ nm ($\Delta\lambda$ is small) and duration of laser impulse of $\tau = 10^{-4}$ s, characteristic for semiconductor lasers. The calculated value of HMPE for $\lambda = 400 + \Delta\lambda$ is equal $5 \cdot 10^{-3}$ J/m^2. At the same time for $\lambda = 400 - \Delta\lambda$ the magnitude of HMPE grows up to 560 (!) (J/m^2).

Apparently, comments are needless here. MPE relation for the next spectral ranges exceeds 5 orders here. With increase in exposure duration this relation only grows. Such "jump" is adequate to the repeated, also justified local increase (reduction) in hygienic coefficient in the borderline area.

Besides, it is necessary to take into account that the spectral transmission of optical system of the eye for radiation with the wavelength of 400 nanometers is 4–5% (see fig. 1). Therefore, with power exposure on cornea of $H_{MPE} = 560$ J/m^2 beam load of retina is equivalent to influence of external radiation flow in visible range with the value of H of about 20 J/m^2. Maximum permissible power exposure for such radiation flow focused on retina is given above ($5 \cdot 10^{-3}$ J/m^2, that is by 3–4 orders of magnitude less). Thus, MPR established by the IEC (ANSI) standard for UV-range in the vicinity of 400 nanometers ensures safety of cornea of eye, but thus guarantees with probability 100% the heaviest injury of retina. Closer, but less pronounced roughnesses take place in intermediate Infrared range.

SanPiN-91

By the beginning of development SanPiN-91, the errors of the ANSI and IEC standards noted above, certainly, were revealed and published. It was unacceptable to adopt the American scenario in its original state. On the other hand, domestic developers were in conditions of number of the restrictions connected with terms of performance of task, the amounts of financing (researches of impact on radiation eyes in the range of 350–450 nanometers originally were not planned). Purely psychological orientation to unification of the document with the western standards and already mentioned intent to make the documen extremely available to the user was also an important factor.

By the results of discussion it was decided to shift demarcation of visible and UV-ranges from 400 to 380 nanometers. Thus the principles of rationing of PLI were unchanged, proceeding from conditions of

k имеют порядок примерно 10^{-1}–10^{-3} $м^{-1}$, такое пренебрежение недопустимо. В зависимости от соотношения указанных факторов действие лазерного излучения может быть опасным не только для роговицы и/или сетчатки глаза, но и для промежуточных интраокулярных структур, таких как радужка, хрусталик, стекловидное тело. Патогенным действием такого излучения на глаза является, например, распространенное и у нас, и на Западе [3] профессиональное заболевание – лучевая катаракта как у стеклодувов (УФ-фон), так и у работников горячих цехов в металлургии, кузнечных мастерских и других (ИК-фон).

В ANSI Z136 и далее в стандартах IEC эти факторы не учитываются. По-видимому, еще при разработке концепции американского стандарта было решено принять в качестве границы между видимым и УФ-диапазонами спектра длину волны $\lambda = 400$ нм. Последующее стремление упростить пользование нормативом привело к допущению о том, что лазерное излучение с длиной волны $\lambda > 400$ нм опасно только для сетчатки. Соответственно, при $\lambda < 400$ рассматривается потенциальная возможность фотоповреждения только роговицы.

Для иллюстрации "работы" этого допущения рассмотрим значения мксимально допустимых экспозиций ($H_{мдэ}$, Дж/м^2), взятые "на вскидку" из последней редакции стандарта IEC для $\lambda = 400 \pm \Delta\lambda$ нм ($\Delta\lambda$ мало) и длительности лазерного импульса $\tau = 10^{-4}$ с, характерной для полупроводниковых лазеров. Расчетное значение $H_{мдэ}$ для $\lambda = 400 + \Delta\lambda$ нм составит $5 \cdot 10^{-3}$ Дж/м^2, и аналогично для $\lambda = 400 - \Delta\lambda$ нм – 560 (!) Дж/м^2.

По-видимому, комментарии здесь излишни: отношение $H_{мдэ}$ для соседствующих спектральных областей здесь превышает 5 порядков. При увеличении длительности экспозиции это отношение дополнительно растет. Такой "скачок" адекватен многократному, также не имеющему обоснования локальному увеличению (уменьшению) гигиенического коэффициента запаса в пограничной области.

Кроме того, необходимо принять во внимание, что спектральное пропускание оптической системы глаза для излучения с длиной волны 400 нм имеет порядок 4–5% (см. рис.1). Следовательно, при энергетической экспозиции на роговице $H_{мдэ} = 560$ Дж/м^2 лучевая нагрузка на сетчатку эквивалентна воздействию внешнего потока излучения в видимой области спектра с величиной H примерно 20 Дж/м^2.

photodamage of cornea by UV-radiation on the one hand, and destructive action of visible light on retina from the other hand.

As the transmission of optical system of eye in the range of 380 nanometers is close to zero [7], the problem of safety of retina has been solved. However, transfer of the specified demarcation has increased the area of unfairly overestimated hygienic coefficient by 20 nanometers due to approximation of real dependence H_{MPL} (λ). A little softened sharp (contradicting to the laws of nature) change of MPL around 380 nanometers has remained, there were (and still are) unstudied and unaccounted conditions of photodamage of intraocular structures to front piece of eyeball, both in UV and near IR-radiation.

These and a number of similar problems have been supposed to solve in the course of subsequent completion of Construction Norms and Regulations. However, as we know, after 1991, the works in the discussed area have been stopped. Americans and later Europeans have not brought (or nearly have not made) the amendments in the standards offered by us. Discussion of the reasons is beyond this article. However we will note that in later development of the American standards of safety (e.g., ICNIRP, Guidelines on Limits of Exposure to Broad-band Incoherent Optical Radiation (0,38–3 μm), 1997) the border of UV-range is transferred to 380 nanometers.

DISCUSSION, CONCLUSIONS, RECOMMENDATIONS

In the author's opinion both compared the document: ANSI-Z136 (later IEC) and the SanPiN-91 deserve extreme respect. They are based on profound and hard work in the field of knowledge, new to the mankind. Therefore some miscalculations and roughnesses are inevitable on the first steps. SanPiN-91 takes more advantageous position in this case as the standard of the second generation which is making use of experience, development and practical application of the ANSI standards and SanPiN-81. A number of the inaccuracies discussed above caused by the level of understanding of problem during this period has been eliminated. The new sections and standards based on the results of the unique researches of state of health of the persons which are professionally working with laser equipment, not having analogs in the West, have been added. These researches have been conducted, in particular, by Moscow Scientific Research Institute named after F.F.Erisman, Central Research Institute of Labor Protection of the All-Union Central Council of Trade Unions, Leningrad Scientific Research Institute of Occupational Health

Предельно допустимая энергетическая экспозиция для такого потока излучения, сфокусированного на сетчатку, как показано выше, составляет ($5 \cdot 10^{-3}$ Дж/м^2, то есть на 3–4 порядка меньше). Таким образом, допустимые пределы излучения (ДПИ), установленные стандартом IEC (ANSI) для УФ-диапазона в окрестности 400 нм, обеспечивают безопасность роговицы глаза, но при этом гарантирует с вероятностью 100% тяжелейшую травму сетчатки. Близкие, но менее ярко выраженные шероховатости имеют место и в переходном ИК-диапазоне.

СанПиН-91

К началу разработки СанПиН-91 отмеченные выше погрешности стандартов ANSI и IEC, безусловно, были выявлены и обнародованы. Принять американский сценарий в первозданном виде было неприемлемо. С другой стороны, отечественные разработчики находились в условиях ряда ограничений, связанных со сроками выполнения задания, объемами финансирования (исследования воздействия на глаза излучения в интервале 350–450 нм первоначально не планировались). Определенную роль, по-видимому, играла чисто психологическая ориентация на унификацию документа с западными стандартами и уже обсуждавшаяся установка сделать норматив предельно доступным для пользователя.

В итоге обсуждения было принято компромиссное решение сдвинуть границу раздела видимого и УФ-диапазонов от 400 до 380 нм. При этом предлагалось оставить в силе прин-

at the enterprises using lasers in technology processes (welding, cutting of materials), in the watch-making industry, in scientific and medical institutions and other areas. By the results of these researches for the first time in world practice SanPiN-91 determines safe working conditions of the specialists who are constantly using laser technology. In the Western Europe and in the USA these conditions are currently normalized by the special documents which often have lower legal status, than state standard.

Thus, there are all objective bases to give preference to SanPiN-91 when settling the controversial issues connected with assessment of degree of danger and working conditions during operation of specific laser equipment. Further it is offered to look at the problems of both Russian and European standards for laser safety under a bit different angle.

From the positions corresponding to modern achievements in the development of the metering (diagnostic) equipment and laser technology, the methods of measurement of ED_{50} and the subsequent calculation of MPL (MAE) which described in detail in the previous sections look primitive and archaic. Measurements were essentially made "at-glance"; statistical processing improved the situation, but did not change it fundamentally. The need to check, at least fragmentary, the received dependency with use, for example, of OCT (optical coherent tomography), ultrasonic methods of high resolution and modern systems of visualization and photoregistration of eye bottom seems to be obvious.

The general scientific, including physical, base (i.e. a set of ideas of mechanisms of interaction of laser radiation with bio-objects) in the discussed

ципы нормирования ПДУ, исходя из условий фотоповреждения роговицы УФ-излучением с одной стороны, и деструктивного действия на сетчатку видимого света, с другой.

Поскольку пропускание оптической системы глаза в диапазоне 380 нм близко к нулю [7], проблема обеспечения безопасности сетчатки была решена. Однако, перенос указанной границы раздела увеличил область неоправданно завышенного коэффициента гигиенического запаса на 20 нм за счет аппроксимации реальной зависимости $H_{пду}(\lambda)$. Осталось в несколько смягченном виде резкое (противоречащее законам живой природы) изменение ПДУ в районе 380 нм. Остались (и остаются) неизученными и неучтенными условия фотоповреждения интраокулярных структур в переднем отрезке глазного яблока как УФ-, так и ближним ИК-излучением.

Эти и ряд аналогичных задач предполагалось решить в процессе последующей доработки СанПиН. Однако, как известно, после 1991 года работы в обсуждаемой области были прекращены. Американцы и идущие в их кильватере европейцы не внесли (или почти не внесли) предложенные нами поправки в свои нормативы. Обсуждение причин выходит за рамки настоящей статьи. Однако отметим, что в более поздних разработках американских стандартов безопасности (например, ICNIRP, Guidelines on Limits of Exposure to Broad-band Incoherent Optical Radiation (0,38–3 мкм), 1997) граница УФ-диапазона перенесена к 380 нм.

ОБСУЖДЕНИЕ, ВЫВОДЫ, РЕКОМЕНДАЦИИ

На наш взгляд оба сравниваемых документа: ANSI-Z136 (позже IEC) и СанПиН-91 – заслуживают в высшей степени уважительного отношения. За ними стоит большая и нелегкая работа в новой для человечества области знаний. Поэтому на первых шагах какие-то просчеты и шероховатости неизбежны. В этом плане СанПиН-91 занимает более выгодную позицию как норматив второго поколения, использующий опыт разработки и применения на практике стандартов ANSI и СанПиН-81. Ряд обсуждаемых выше неточностей, обусловленных уровнем понимания проблемы в тот период, был устранен. Добавлены новые разделы и нормативы, основанные на результатах уникальных, не имеющих аналогов на Западе, исследований состояния здоровья лиц, про-

documents corresponds to the level of 70–80th. The last decades have presented many serious achievements and new opportunities of development in this scientific direction. These achievements are connected, in particular, with essential expansion of laser application in medicine. Here physical and physiological problems of influence of laser radiation are considered with the most different parameters on tissues and bodies, both locally and at the level of reactions of organism in general. The developed concepts and modern methods of the researches can be certainly used when updating standards for laser safety.

The research conducted in insufficient volume when developing of SanPiN-91 remains relevant owing to, as a rule, a lack of laser technology with necessary parameters during that period. It concerns mechanisms and conditions of photodamage of tissues by radiation in intermediate spectral intervals, near and far IR range, as well as, certainly, conditions of photodamage of tissues by laser impulses of picosecond and femtosecond duration. The data presentation form in the considered documents including the considered simplifications and approximations is absolutely inadequate to the level of the modern user mastering the computer practically from a five-year age.

The general conclusion is obvious. The considered normative documents both domestic, and Western European need radical reconstruction. Such reconstruction demands forming of the accompanying Program of researches and corresponding financing.

Creation of the normative document integrated with a simple, available for modifications computer program can be the acceptable decision, in my opinion. It is absolutely necessary to refuse all simplifying assumptions and current approximations. The program shall be based on real experimental and/or rated dependencies of threshold energy (or other threshold power characteristics) from radiation source parameters. In the far UV- and IR-ranges there shall be boundary conditions of photodamage of cornea, in the visible area – of retina, respectively, without any simplifications of function of optical transmission [7]. In intermediate spectral intervals it is reasonable to use two or three dependencies defining the conditions of photodamage of cornea, retina or other intraocular structures and to choose the most potentially dangerous option. Thus the choice of conditional border of UV-visible range does not influence the end result and has purely directory character. The input of the program includes passport

фессионально работающих с лазерной аппаратурой. Эти исследования проводились, в частности, Московским НИИ им.Ф.Ф.Эрисмана, ЦНИИ охраны труда ВЦСПС, Ленинградским НИИ гигиены труда на предприятиях, использующих лазеры в технологических процессах (сварка, резка материалов), в часовой промышленности, в научных и медицинских учреждениях и других областях. По результатам этих исследований впервые в мировой практике в СанПиН-91 определены безопасные условия работы специалистов, постоянно использующих лазерную технику. На Западе и в США эти условия сегодня нормируются специальными документами, часто имеющими более низкий правовой статус, чем государственный стандарт.

Таким образом, есть все объективные основания отдать предпочтение СанПиН-91 при разрешении спорных вопросов, связанных с оценкой степени опасности и условий труда при работе с конкретной лазерной аппаратурой. Далее предлагается взглянуть на проблемы и российских, и европейских нормативов по лазерной безопасности под несколько иным углом зрения.

С позиций, соответствующих современным достижениям в разработке измерительной (диагностической) аппаратуры и лазерной техники, методы измерения ED_{50} и последующего расчета ПДУ (МДЭ), так подробно описанные в предыдущих разделах, выглядят примитивными и архаичными. Измерения по существу делались "на глазок", статистическая обработка улучшала ситуацию, но не изменяла ее принципиально. Очевидна необходимость проверить, хотя бы фрагментарно, полученные зависимости с использованием, например, ОКТ (оптической когерентной томографии), ультразвуковых методов высокого разрешения, современных систем визуализации и фоторегистрации глазного дна.

Общенаучная, в том числе физическая база (я имею в виду совокупность представлений о механизмах взаимодействия лазерного излучения с биообъектами) обсуждаемых документов соответствует уровню 70-80-х годов. Последние десятилетия подарили немало серьезных достижений и новых возможностей развития этого научного направления. Отмеченные достижения связаны, в частности, с существенным расширением применения лазеров в медицине. Здесь рассматривались физические и физиоло-

гические проблемы воздействия лазерного излучения с самыми различными параметрами на ткани и органы – как локально, так и на уровне реакций организма в целом. Развитые концепции и современные методы исследований, безусловно, могут быть использованы при обновлении нормативов по лазерной безопасности.

Актуальными остаются исследования, проведенные в недостаточном объеме в период разработки СанПиН-91, вследствие, как правило, отсутствия в тот период лазерной техники с необходимыми параметрами. Это касается механизмов и условий фотоповреждения тканей излучением в переходных спектральных интервалах, в ближней и дальней ИК-областях спектра, а также, безусловно, условий фотоповреждения тканей лазерными импульсами пико- и фемтосекундного диапазона длительности. Форма представления данных в приведенных здесь документах, включающая рассмотренные упрощения и аппроксимации, совершенно неадекватна уровню современного пользователя, осваивающего компьютер практически с пятилетнего возраста.

Общий вывод очевиден. Анализируемые нормативные документы как отечественные, так и западноевропейские нуждаются в коренной реконструкции. Такая реконструкция требует формирования сопутствующей программы исследований и соответствующего финансирования.

Приемлемым решением, на мой взгляд, может стать создание нормативного документа, составной частью которого будет несложная, доступная для узаконенных модификаций, компьютерная программа. Необходимо совершенно отказаться от всех упрощающих допущений и нынешних аппроксимаций. В основе программы должны быть реальные экспериментальные и/или расчетные зависимости пороговой энергии (или других пороговых энергетических характеристик) от параметров источника излучения. В дальних УФ- и ИК-областях должны определяться пограничные условия фотоповреждения роговицы, в видимой области – соответственно, сетчатки без каких либо упрощений функции оптического пропускания [7]. В переходных спектральных интервалах целесообразно использовать две, если нужно три, зависимости, определяющие условия фотоповреждения роговицы, сетчатки или иных интраокулярных структур и выбрать наиболее потенциально опасный вариант.

data of radiation source, the output includes the results of calculation of PLI, danger class, distance within which the source is dangerous to eyes (NOGR), and any other demanded information. Certainly the considerations stated above are only reference. There is suspicion that inclusion of the computer program in the structure of the normative document can contradict to any state standard specification from ancient times. It is necessary to be ready to resistance to pathological official bureaucracy.

Let's note that the similar program oriented to the dependency set in SanPiN-91 has been created, approximately, in 1990 under the leadership of Professor B.N.Rakhmanov. It was a very useful development which has remained in limited circle of users, probably, only because there were no due measures to distribute it. Today the problem of creation of the normative document can be solved. In some years when we lose many SanPiN developers for the natural reasons (cherished memory of the passed away), it will be much more difficult to solve such problem. It is in many respects caused by the fact that in connection with reduction of volume of the discussed researches in this country (and abroad as well) the average link (age of 30–40 years old) of specialists in the field of interaction of radiation with bio-objects (laser-tissue interaction) has not increased. Training of new generation requires time.

Forming of the coordinate European-Russian Program for safety during the work with lasers including basic researches, amendment of the existing documents and the subsequent joint development of the updated international standards seems to be ideal (forgive me being naïve). Such decision includes both safety of the personnel and smooth harmonization of standards. Involvement of "arbitration judge", for example, China showing great interest to the discussed problems in recent time can be reasonable.

More feasible (and urgently necessary in essence) is stimulation of the researches aimed at providing safe operation of laser technology in the state scale. Argumentative evidence-based updating of hopelessly outdated standards in the field of laser safety has to become one of the most important practical results of such researches. It is worth mentioning that when developing State "Strategic program for photonics and its applications", accepted in 2014 in Russia and comprehensively covering the most important directions of development laser technology (including medical), apparently, have not considered the health protection of the people servicing such equipment.

При этом выбор условной границы УФ–видимого диапазона спектра не влияет на конечный результат и имеет чисто информационно-справочный характер. На входе программы вводятся паспортные данные источника излучения, на выходе – результаты расчета ПДУ, класса опасности, дистанция, в пределах которой источник опасен для глаз, и любая другая востребованная информация. Разумеется приведенные выше соображения – это только эскиз. Есть подозрение, что включение компьютерной программы в состав нормативного документа может противоречить какому-либо ГОСТу "времен Очакова и покоренья Крыма". Нужно быть готовыми к сопротивлению патологическому чиновничьему бюрократизму.

Отметим, что подобная программа, ориентированная на зависимости, заданные СанПиН –91, создавалась примерно в 1990 году под руководством профессора Б.Н.Рахманова. Это была очень полезная разработка, оставшаяся в ограниченном круге пользователей, видимо, только потому, что не было принято должных мер по ее распространению.Сегодня задачу по созданию нормативного документа в предложенном выше виде еще можно решить. Через несколько лет, когда мы потеряем по естественным причинам многих разработчиков СанПиН (светлая память уже ушедшим), решить такую задачу будет значительно сложней. Это во многом обусловлено тем, что в связи с сокращением объема обсуждаемых исследований у нас (кстати, и на Западе тоже) не выращено среднее звено (возраст 30–40 лет) специалистов по проблемам взаимодействия излучения с биообектами (laser-tissue interaction). Обучение нового поколения требует времени.

Идеальным (простите за строительство замков на песке) представляется формирование координированной европейско-российской программы по обеспечению безопасности при работе с лазерами, включающей базовые исследования, корректировку существующих документов и последующую совместную разработку обновленных международных стандартов. Такое решение предлагает как обеспечение безопасности персонала, так и бесконфликтную унификацию нормативов. Целесообразным может быть привлечение "Третейского судьи", например Китая, проявлявшего в недалеком прошлом большой интерес к обсуждаемой проблематике.

Более реальным (а по существу – настоятельно необходимым) сегодня является стимулирование в государственном масштабе исследований, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации лазерной техники. Одним из важнейших практических результатов таких исследований должно стать доказательное, научно обоснованное обновление безнадежно устаревших нормативов в сфере лазерной безопасности. Заметим, что при разработке Государственной "Стратегической программы по тематике фотоники и ее применений", принятой в 2014 году и всесторонне охватывающей важнейшие направления развития лазерной техники (в том числе медицинской), об охране здоровья людей, обслуживающих эту технику, по-видимому, не подумали.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рахманов Б.Н., Кибовский В.Т.** Лазерная безопасность. Документы новые – проблемы старые. – Лазер Информ № 21–22, ноябрь 2016.
   Rahmanov B.N., Kibovskij V.T. Lazernaya bezopasnost". Dokumenty novye – problemy starye. – Lazer Inform № 21–22, noyabr" 2016.
2. **Минаев В.П.** О новых СанПиН. – Лазер Информ № 19–20, октябрь 2016.
   Minaev V.P. O novyh SanPiN. – Lazer Inform № 19–20, oktyabr" 2016.
3. **Sliney D., Wolbarsht M.** Safety with Lasers and Other Optical Sourses. A Compehensive Handbook. – N.Y. & London: Plenum Press, 1982.
4. **Желтов Г.И.** Воздействие интенсивного оптического излучения на ткани глаз: исследования и приложения. – Минск, 1996. Библиотека авторефератов и диссертаций по физико-математическим и химическим наукам. URL: http://fizmathim.com/read/510958/a?#?page=1 (дата обращения: 09.01.2017).
   ZHeltov G.I. Vozdejstvie intensivnogo opticheskogo izlucheniya na tkani glaz: issledovaniya i prilozheniya. – Minsk, 1996. Biblioteka avtoreferatov i dissertacij po fiziko-matematicheskim i himicheskim naukam. URL: http://fizmathim.com/read/510958/a?#?page=1 (Date of access 09.01.2017).
5. **Frankhauser F., Kwasnewska S.,** Laser in Ophthalmology. Basic, diagnostic and surgical aspects. – Hague, Niderland, 2003.
6. **Желтов Г.И.** О нормативных документах по лазерной безопасности. ч.1.– В кн: Как это было. – М.: Изд-во ФИАН, 2006, с.347–350.
   ZHeltov G.I. O normativnyh dokumentah po lazernoj bezopasnosti. Ch.1.– V kn: Kak ehto bylo. – M.: Izd-vo FIAN, 2006, s.347–350.
7. **Geeraets W.J., Berry E.R.** Ocular spectral characteristics as related to hazard from laser and other optical sources. – Am. J.Ophthalmol., 1968, v. 66, № 1, p. 15–23.
8. **Beatriss A.I., Frish G.D.** Retinal Laser DamageThresholds as a Function of Image Diameter. – Arch. Environ. Health, 1973, v.27, № 11, p. 322–326.
9. **Lund D.J., B.J.Lund.** The Determination of Laser-induced Retinal Injury Thresholds. – ILSC 2015 Conference Proceedings, Laser Safety Session, p.69–73, March 2015.