

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИЛЛЯРНОГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО КОНТРОЛЯ

© 2022 г. И.И. Кудинов<sup>1,\*</sup>, А.Н. Головков<sup>1,\*</sup>, П.А. Шишкин<sup>2,\*\*</sup>, Д.С. Скоробогатько<sup>1,\*</sup>,  
А.И. Андреев<sup>3</sup>, А.С. Генералов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ), Россия 105005 Москва, ул. Радио, 17

<sup>2</sup> Общество с ограниченной ответственностью «АРИОН» (ООО «Арион»),

Россия 603093 Нижегородская обл., Нижний Новгород, ул. Родионова, 134, литер А, помещение 3

<sup>3</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)),

Россия 127994 Москва, ГСП-4, 2. ул. Образцова, 9, стр. 9

E-mail: \*viamlab622@gmail.com; \*\*info@ari-on.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021; после доработки 17.01.2022

Принята к публикации 17.01.2022

Предложен комплексный подход по оценке эффективности различных источников ультрафиолетового излучения, используемых при проведении капиллярного люминесцентного метода неразрушающего контроля. Приведены спектральные характеристики излучения современных отечественных и зарубежных УФ-облучателей, используемых при контроле деталей и узлов авиационной техники в авиационной отрасли. Определены основные параметры, позволяющие наиболее полно оценить ультрафиолетовые источники на соответствие требованиям отечественных и зарубежных нормативных документов по энергетическим характеристикам источников на этапе осмотра технологического процесса капиллярного контроля. Показано влияние использования УФ-источников различного типа на результаты контроля образцов и деталей с различными конструктивными особенностями, содержащих производственные и эксплуатационные дефекты различного размера. Установлено, что для оценки различных УФ-облучателей характеристик, указанных в их технической документации (паспортах), для дефектоскописта недостаточно. Данный подход позволит оценить и выбрать современные источники УФ-излучения с учетом требований стандартов, действующих на предприятиях.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, капиллярный контроль, ультрафиолетовое излучение, источник ультрафиолетового излучения, пенетрант, спектр люминесценции, спектр поглощения.

DOI: 10.31857/S0130308222010055

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных методов неразрушающего контроля, применяемым для оценки качества продукции при производстве и эксплуатации деталей и узлов авиационной техники, как простой, так и сложной конфигурации, является метод капиллярного контроля, позволяющий выявлять на поверхности несплошности материала различного размера. Данный метод позволяет регистрировать дефекты за счет формирования индикаторного рисунка в местах расположения несплошностей материала, размеры которого значительно превышают ширину раскрытия дефекта. Самым контрастным и, соответственно, самым чувствительным методом капиллярного контроля является люминесцентный, обнаруживающий поверхностные дефекты шириной раскрытия 1 мкм и менее. Основным отличием данного метода является то, что осмотр контролируемых поверхностей деталей на наличие дефектов проводится в затемненных помещениях с использованием источника ультрафиолетового излучения ближнего диапазона (УФ-А), позволяющего визуально регистрировать яркие и контрастные индикаторные рисунки с максимумом спектра излучения, соответствующим максимальной чувствительности зрительной системы человека над несплошностями материала различного размера. Эффективность обнаружения дефектов при проведении капиллярного люминесцентного контроля зависит от размера индикаторного следа, его цветовой или яркостной контрастности по отношению к фону, полученному на поверхности. При регистрации индикации обычно учитывают три взаимосвязанные субъективные характеристики, такие как оттенок цвета, его контрастность и яркость. Восприятие цвета наблюдаемого флуоресцентного свечения от индикации дефекта зависит от многих факторов: формы и размера индикации; фотолюминесцентных характеристик красителей, входящих в состав используемых дефектоскопических материалов (спектра поглощения и люминесценции), их концентрации; спектрального распределения и интен-

сивности излучения УФ-источников; цвета, яркости и размеров фона наблюдения (цветовой контраст). Обязательно необходимо отметить, что характеристики фона зависят от шероховатости поверхности, наличия или отсутствия проявителя, его типа, а также от источника УФ-излучения.

В настоящее время одной из перспективных задач капиллярного неразрушающего контроля является повышение минимального размера обнаруживаемого дефекта с целью обеспечения высоких требований к выпускаемой продукции ответственного назначения [1, 2]. Существует множество путей решения данной задачи, одним из которых является увеличение яркости и контрастности индикаторного рисунка дефекта за счет максимального согласования физических и оптических свойств дефектоскопических материалов и спектральных и энергетических характеристик УФ-облучателей [3].

Объем заполнения полости дефекта, очищенной от различных видов загрязнений [4], проникающей жидкостью и степень ее извлечения проявляющими составами являются одними из самых важных характеристик наборов дефектоскопических материалов, влияющих на достижение порогового значения люминесценции для используемой многокомпонентной системы, содержащей люминофор с физической точки зрения, а с практической — на обнаружение дефектов зрительной системой человека [5, 6]. Еще одной важной характеристикой наборов дефектоскопических материалов является спектральное распределение энергии излучения люминесценции проникающих жидкостей в УФ-свете, которая в свою очередь зависит от спектрального распределения энергии поглощения данной проникающей системы и величины интенсивности падающего на нее излучения.

Среди основных факторов, учитывающих оптические свойства дефектоскопических материалов, используемых при капиллярном люминесцентном контроле, позволяющих достичь высокой доли обнаружения дефектов, необходимо выделить:

необходимость использования люминесцентных красителей, входящих в состав проникающих жидкостей, с заданными оптическими свойствами:

а) имеющих характерный максимум спектра поглощения в сложной многокомпонентной системе, близкий к максимуму спектра ультрафиолетового излучения УФ-облучателей, применяемых при проведении капиллярного люминесцентного контроля;

б) имеющих спектр излучения в области максимальной чувствительности (на кривой видности) зрительной системы человека при практически полном отсутствии дневного освещения;

необходимость проведения осмотра с использованием специальных источников, имеющих строго ограниченный узкополосный эмиссионный спектр в области диапазона УФ-А (от 315 до 400 нм) с максимумом спектра на длине волны  $365 \pm 5$  нм и с заданной интенсивностью при минимальной доле в области излучения, которая граничит с видимым диапазоном.

необходимость использования проявляющих жидкостей, создающих при нанесении на поверхности контролируемых деталей белую или серо-белую пленку, эффективно извлекающие пенетрант из полостей дефектов, с особыми оптическими свойствами, позволяющими частично поглощать и рассеивать ультрафиолетовое излучение, формируя равномерный фон без бликов при осмотре деталей в УФ-свете, обеспечивая максимальный контраст между индикацией дефекта и фона.

Согласно закону С.И. Вавилова, энергетический выход люминесценции растет пропорционально длине волны возбуждающего света, поэтому для каждого люминофора (красителя), входящего в состав набора дефектоскопических материалов, такая закономерность справедлива до определенной длины волны. На всем участке спектра с коротковолновой стороны до этого значения сохраняется постоянство квантового выхода, цвета и спектра люминесценции и описывается в виде зависимости [7]:

$$\Phi = (\lambda_a / \lambda_e) \cdot Q, \quad (1)$$

где  $\Phi$  — энергетический выход;  $Q$  — квантовый выход;  $\lambda_a$  — длина волны поглощенного излучения;  $\lambda_e$  — длина волны испускаемого излучения ( $\lambda_e = \text{const}$  при  $\lambda_a \rightarrow \lambda_e$  и  $\lambda_a / \lambda_e \rightarrow 1$ ).

Таким образом, повысить энергетический выход люминесценции в капиллярной дефектоскопии при обнаружении дефектов (особенно малых размеров) возможно только при согласованном выборе набора дефектоскопических материалов и источников УФ-облучения.

В зарубежных литературных источниках подробно описаны оптические фотолюминесцентные характеристики красителей входящих в состав современных зарубежных дефектоскопических материалов, влияющих на обнаружение дефектов. Показаны основные факторы, влияющие на яркость и контрастность индикаторных рисунков, сформированных над дефектом при проведении

капиллярного люминесцентного контроля при осмотре в УФ-свете [8—14], однако спектральных и энергетических характеристик многокомпонентных проникающих систем в полном объеме авторами статьи не приведено.

Для капиллярного люминесцентного контроля разработано большое количество разнообразных типов источников ультрафиолетового облучения разной мощности. Большое многообразие современных источников вводит специалистов в затруднение при их выборе. Характеристики, приведенных в паспортах или руководствах по эксплуатации, недостаточно для определения эффективности их использования с точки зрения выявляемости дефектов и установления соответствия требованиям отечественных и зарубежных стандартов, без проведения дополнительных экспериментальных измерений и полученных в ходе их обработки ряда параметров. Как правило, в паспортах содержатся следующие основные технические характеристики источников УФ-освещения: тип источника; потребляемая мощность; входное напряжение питания; номинальное напряжение аккумуляторной батареи (при наличии); длина волны максимума излучения; величина ультрафиолетовой облученности на расстоянии  $L$  (325, 380, 400 или 500 мм) от источника; размер области контроля; доля видимого света в режиме УФ и др. Из приведенных параметров видно, что они необходимы для оценки качества ламп и их соответствия установленным требованиям технической документации, действующей на предприятиях в области охраны труда и требований техники безопасности.

Среди отечественных литературных источников необходимо выделить статью [15], содержащую описание особенностей применения различных типов современных УФ-источников, используемых на этапе осмотра при проведении капиллярного контроля, и сравнительный анализ их технических параметров. Также в данной статье приведены экспериментальные исследования результатов капиллярного контроля, при использовании различных облучателей (ртутных, светодиодных и эксиламп), но без указания значений величин энергетической освещенности, создаваемой на поверхности рассматриваемыми источниками на заданном расстоянии.

Особое внимание стоит обратить на доклад зарубежных специалистов, в котором содержатся зарегистрированные на фото результаты контроля образцов с трещинами малоциклового усталости при различной ультрафиолетовой освещенности, создаваемой различными типами источников излучения [16].

Для сравнения и оценки технологий, оборудования и наборов, используют вероятностную оценку обнаружения дефектов, как эффективный и наглядный инструмент [17—19]. Так, в статье [20] проведена оценка вероятности обнаружения различных дефектов при использовании в процессе осмотра ртутной УФ-лампы, для различной облученности контролируемых поверхностей — 400 и 1200 мкВт/см<sup>2</sup>. Работ по сравнению ультрафиолетовых источников различного типа по критерию вероятности обнаружения дефектов не было найдено.

По итогам проведенного литературного анализа во всех источниках подтверждается, что повышение интенсивности ультрафиолетового излучения (при соблюдении всех мер техники безопасности при работе с УФ-источниками излучения) является благоприятным фактором и приводит к росту контраста между индикацией дефекта и фоном (сигнал/шум).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Определение оптических свойств современных проникающих многокомпонентных жидкостей

За последнее время для капиллярного люминесцентного контроля разработано большое количество проникающих люминесцентных жидкостей как отечественного, так и зарубежного производства. Все проникающие люминесцентные жидкости разрабатываются с учетом требований к УФ-источникам, применяемым при проведении капиллярного контроля, установленным в отечественных [21] и зарубежных стандартах [22]. Производители наборов дефектоскопических материалов используют в составе пенетрантов различные люминесцентные красители. Поэтому все проникающие вещества могут иметь разные, но близкие оптические свойства.

Для определения спектров поглощения современных дефектоскопических материалов отечественного и зарубежного производства, применяемых при люминесцентном контроле деталей и узлов авиационной техники, был использован двулучевой спектрофотометр с диапазоном измерений от 200 до 900 нм. Получены спектры поглощения различных пенетрантов в диапазоне от 310 до 450 нм (рис. 1).

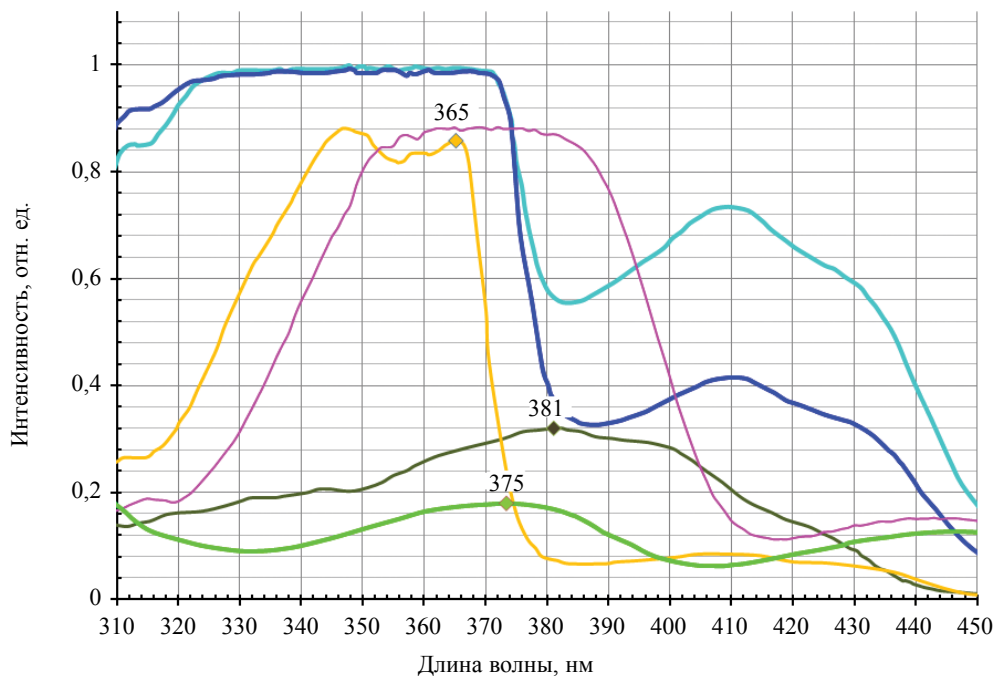


Рис. 1. Спектры поглощения проникающих жидкостей отечественного и зарубежного производства.

Из полученных зависимостей видно, что спектры поглощения всех выбранных проникающих жидкостей, входящих в наборы дефектоскопических материалов с особо высоким уровнем чувствительности включают в себя установленный в нормативной документации максимум спектра излучения УФ-источников 365 нм, что способствует эффективному поглощению возбуждающего излучения и эффективному увеличению энергетического выхода люминесценции.

Как отмечено ранее, вторым оптическим свойством, обеспечивающим визуальную регистрацию индикаторного рисунка, является характеристический спектр излучения (люминесценции) многокомпонентной жидкости, который должен соответствовать максимуму «функции спектральной чувствительности» зрительной системы человека. Для определения спектров люминесценции дефектоскопических материалов отечественного и зарубежного производства был использован люминесцентный спектрофотометр с высокой чувствительностью и диапазоном измерений от 200 до 900 нм. Получены спектры люминесценции различных пенетрантов в диапазоне от 400 до 700 нм, возбуждаемых монохроматическим излучением 365 нм заданной интенсивности, соответствующего требованиям к максимуму спектров излучения УФ-облучателей (рис. 2).

Из полученных распределений видно, что максимумы спектров излучения всех современных проникающих многокомпонентных систем, входящих в набор дефектоскопических материалов с особо высоким уровнем чувствительности, имеют характерный максимум спектра люминесценции в диапазоне от 502 до 528 нм, что соответствует области максимальной чувствительности (на кривой видности) человеческого глаза в затемненном помещении (около 510 нм). На поверхности контролируемой детали в местах несплошностей материала, при использовании разных наборов, цвет индикаторного рисунка может меняться от голубовато-зеленого до желто-зеленого. Следует отметить, что кривая видности человеческого глаза при недостаточной освещенности, в сумеречном свете, смещается в сторону коротковолновой области (эффект Пуркине) [23].

Из полученных выше результатов (см. рис. 1 и 2) видно, что все рассматриваемые дефектоскопические материалы практически в равной степени создают необходимые условия для обеспечения максимальной чувствительности. Поэтому повысить размер минимально обнаруживаемого дефекта для определенного набора, с учетом только оптических свойств, возможно за счет увеличения энергетического выхода, а именно за счет увеличения облученности ультрафиолетовым излучением контролируемой поверхности.

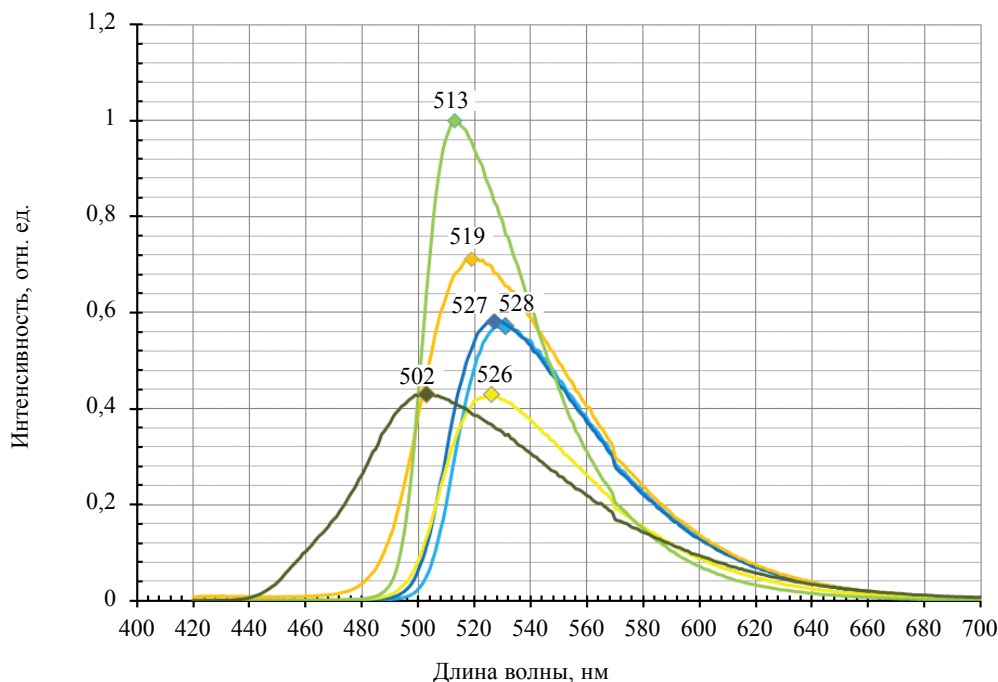


Рис. 2. Спектры люминесценции проникающих жидкостей отечественного и зарубежного производства.

### Определение технологических параметров источников ультрафиолетового излучения

Как показывает опыт эксплуатации различных УФ-источников на авиационных предприятиях, яркость индикации дефекта и фона на поверхности изменяются в зависимости от типа источника, а также наличия или отсутствия светофильтра на лампе, то есть от энергетических характеристик спектра УФ-излучения.

Для оценки влияния различных типов УФ-источников на результаты капиллярного люминесцентного контроля образцов и деталей с производственными и эксплуатационными дефектами были рассмотрены передвижные, переносные и стационарные источники ультрафиолетового излучения различного типа (ртутные и светодиодные) со светофильтром и без, такие как Magnaflux ZB100F, КД-33Л, Labino-Torch-Light-UVG2 Floodlight (без светофильтра), ATG UV 400 DF (без светофильтра), а также УФ-источник с возможностью регулирования интенсивности излучения Элитест УФС-12 Black Light.

С целью определения не указанных в паспорте характеристик были получены энергетические спектры исследуемых ламп в диапазоне длин волн 305—425 нм. Результаты распределения интенсивности излучения по длинам волн для всех исследуемых источников показаны на рис. 3. Все спектры получены с использованием оптоволоконного спектрометра с выносным полихроматическим датчиком при заданном уровне УФ-облученности ( $\approx 3000$  мкВт/см<sup>2</sup>).

Из полученных данных видно, что спектры излучения всех ртутных облучателей имеют узкополосный эмиссионный спектр, с характерным пиком в диапазоне длин волн от 365 до 370 нм. Для диодных облучателей спектр широкополосный с максимумом в том же диапазоне.

Спектры излучения от ртутных газоразрядных ламп КД33Л и UV 400 DF помимо основного имеют дополнительные пики, в том числе в области видимой части спектра с максимумом 405 нм, но по величине значительно меньшей, чем полезный характерный эмиссионный пик. Наличие дополнительного характерного пика в области видимой части спектра (405 нм) обуславливает появление паразитного излучения, которое необходимо учитывать при контроле. Согласно колориметрической системе координат цветности, длина волны 405 нм соответствует фиолетовой области видимой части спектра. Поэтому для данных ламп особенно стоит учитывать возможность появления фиолетового фона на поверхности контролируемой детали при осмотре. Установленные спектральные характеристики показаны в табл. 1.

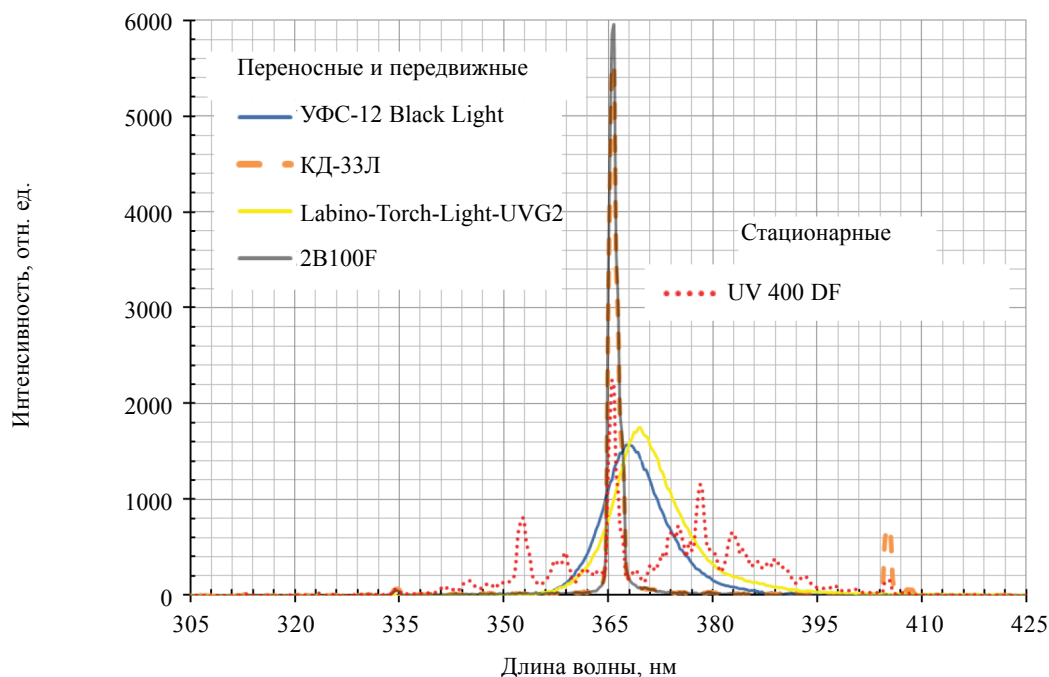


Рис. 3. Вид спектров излучения УФ-облучателей отечественного и зарубежного производства.

Таблица 1

## Спектральные параметры УФ-источников

Наименование УФ-источников излучения	Максимум излучения на длине волны, нм	Ширина спектра на полувысоте, нм
Переносные и передвижные источники		
Magnaflux ZB100F	365,83	1,46
КД-33Л	365,83	1,47
Labino-Torch-Light-UVG2 Floodlight	369,56	9,75
Элитест УФС-12 Black Light	367,55	9,44
Стационарные источники		
ATG UV 400 DF	365,54	1,61

Из рис. 3 и табл. 1 видно, что ширина полезного эмиссионного спектра светодиодных ламп значительно превышает ширину спектра ртутных ламп, поэтому стоит учитывать, что с увеличением интенсивности излучения доля видимого света для светодиодных ламп будет расти быстрее, чем от ртутных при отсутствии в них паразитных эмиссионных пиков.

При контроле деталей сложной конфигурации в авиационной отрасли используются в основном переносные или передвижные источники УФ-облучения. Для более детального рассмотрения границ индикации дефектов, труднодоступных мест деталей или зон, где необходим направленный контроль, контролер визуально проводит осмотр данных участков с расстояния  $\approx 200$  мм (как показывает опыт), а иногда и ближе с использованием луп, при этом, уменьшив расстояние от источника излучения до ОК, чтобы избежать прямого попадания излучения в глаза. Обеспечить требования стандартов в части, касающейся энергетической освещенности поверхности на таких расстояниях, возможно не для всех УФ-ламп. С этой целью был определен диапазон расстояний от источника излучения до исследуемой поверхности, при которых обеспечиваются требования, установленные Российскими [21] и Международными [22] нормативными документами, назовем

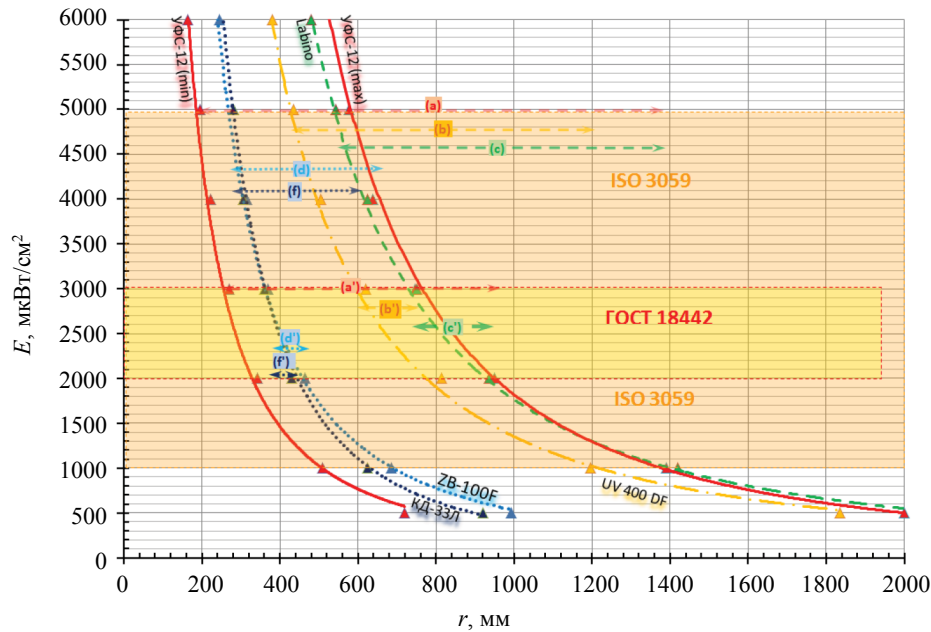


Рис. 4. Вид полученных экспериментальных зависимостей  $E(r)$  для всех рассматриваемых УФ-облучателей.

его диапазоном рабочих расстояний ( $R$ ). Измерения максимальной величины энергетической освещенности ( $E$ ) различных УФ-облучателей в диапазоне от 500 до 6000 мкВт/см<sup>2</sup> проводились на различных расстояниях ( $r$ ) с использованием аттестованного ультрафиолетового радиометра. Результаты измерений показаны на рис. 4 и в табл. 2 в виде экспериментальных зависимостей ультрафиолетовой облученности от расстояния  $E(r)$  для всех типов УФ-облучателей.

Из данных зависимостей определен диапазон рабочих расстояний  $R_{2000-3000}$  и  $R_{1000-5000}$  соответствующих требованиям по облученности, установленным ГОСТ 18422 от 2000 до 3000 мкВт/см<sup>2</sup> для наборов с особо высокой и высокой чувствительностью и ISO 3059 от 1000 до 5000 мкВт/см<sup>2</sup> (см. табл. 2).

Таблица 2

Диапазон рабочих расстояний ( $R$ ) для УФ-облучателей, при которых обеспечиваются требования по облученности, установленные ГОСТ 18442 и ISO 3059

Наименование УФ-источника	$R_{(2000-3000)}$ , мм	$R_{(1000-5000)}$ , мм	$E(r)$
Элитест УФС-12 Black Light	a = 255—950	a' = 185—1378	$E_{min} = 20\,729\,093,7 \cdot r^{-1,59532}$ $E_{max} = 710\,946\,955,6 \cdot r^{-1,86395}$
ATG UV 400 DF	b = 595—775	b' = 427—1215	$E = 55\,469\,495,8 \cdot r^{-1,53775}$
Labino Torsh Light UVG 2 Floodlight	c = 730—929	c' = 539—1400	$E = 197\,074\,350,6 \cdot r^{-1,68266}$
Magnaflux ZB100F	d = 369—462	d' = 277—680	$E = 117\,918\,392,3 \cdot r^{-1,79023}$
КД-33Л	f = 362—445	f' = 280—632	$E = 336\,973\,515,5 \cdot r^{-1,973756}$

Из рис. 4 и табл. 2 видно, что максимальный диапазон рабочих расстояний и минимально возможное расстояние (с учетом требований стандартов) при осмотре обеспечивается облучателем

Элитест УФС-12 Black Light, оснащенным устройством регулировки интенсивности излучения (энкодером).

В директивах и технических спецификациях зарубежных передовых компаний, таких как Rolls-Royce или Airbus [24], установлено, что величина УФ-облученности на расстоянии 15 inches (38 см) не должна превышать значений  $5000 \text{ мкВт/см}^2$ . Анализируя рис. 4, можно установить, что не все УФ-облучатели, например Labino Torch Light UVG 2 Floodlight, ATG UV 400 DF и не весь диапазон УФ-лампы с энкодером типа Элитест УФС-12 Black Light, возможно использовать при контроле деталей, выпускаемых по данным спецификациям.

Существует техническая спецификация, в которой допускается облученность свыше  $5000 \text{ мкВт/см}^2$  на расстоянии 15 inches. Из рис. 4 видно, что УФ-лампы Magnaflux ZB100F и КД-33Л не обеспечат таких условий осмотра.

Следует также отметить, что для мощных УФ-облучателей (особенно без энкодера), при соблюдении требований по облученности, обеспечивается расстояние при контроле от источника излучения до ОК, достаточно неудобное при осмотре дефектоскопистами деталей, что может привести к нарушению условий охраны труда, а именно, к прямому попаданию УФ-излучения в глаза человека. Данное условие, даже при наличии защитных очков, может быть мешающим фактором при осмотре и привести к пропуску дефекта.

От рабочего расстояния также зависит еще одна важная величина, необходимая для дефектоскописта при контроле — это диаметр пятна ( $D$ ). В некоторых паспортах указывается размер диаметра пятна, но без учета действующих требований по облученности, установленных в действующих стандартах. Для этого был определен диаметр пятна, при котором обеспечиваются требования, установленные ГОСТ 18442 и ISO 3059 для различных типов УФ-источников. Назовем его «рабочим диаметром пятна». Определение данного экспериментального параметра проводилось по результатам оценки размеров облучаемых ультрафиолетовых полей на плоскости, с последующим построением распределения УФ-облученности. Примеры результатов построения распределений при установленном значении УФ-облученности  $\sim 3000 \text{ мкВт/см}^2$  в центре фокусного пятна показаны на рис. 5 для ртутной и для светодиодных ламп.

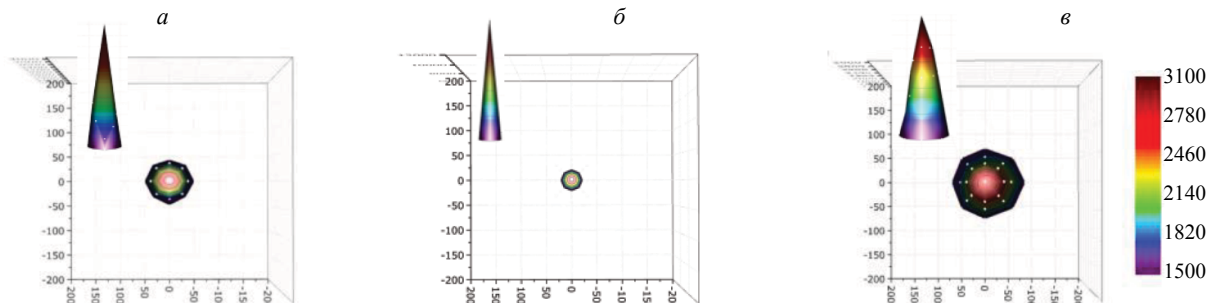


Рис. 5. Примеры полученных распределений УФ-облученности ртутной Magnaflux ZB100F (а) и светодиодных Labino Torch Light UVG 2 Floodlight (б), УФС-12 Black Light УФ-ламп (в).

Из распределений получены экспериментальные усредненные значения рабочего диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения менялась от  $2000$  до  $3000 \text{ мкВт/см}^2$  в соответствии с требованиями ГОСТ 18442. Аналогичным образом получены данные диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения менялась от  $1000$  до  $5000 \text{ мкВт/см}^2$  в соответствии с требованиями ISO 3059. Результаты показаны в табл. 3

Для ртутной лампы КД-33Л не удалось корректно определить размер диаметра пятна, так как фокусное пятно было ассиметрично, с трудно определяемыми границами и смещено относительно геометрического центра источника (рис. 6).

Все типы ультрафиолетовых ламп генерируют помимо ультрафиолетового излучения небольшое количество света в видимом спектральном диапазоне. Практически все УФ-источники, используемые для неразрушающего контроля, имеют соответствующие светофильтры, внутренние или внешние по отношению к источнику света, для того чтобы свести к минимуму



**Значения рабочего диаметра пятна, в пределах которого величина интенсивности ультрафиолетового излучения соответствует требованиям ГОСТ 18442 и ISO 3059**

Диапазон УФ-облученности, мкВт/см <sup>2</sup>	Рабочий диаметр пятна, мм			
	Magnaflux ZB100F	Labino Torsh Light UVG 2 Floodlight	Элитест УФС-12 Black Light	
			Режим min облученности	Режим max облученности
$D_{(1000-5000)}$	170	107	150	403
$D_{(2000-3000)}$	70	65	93	275



Рис. 6. Вид фокусного пятна от УФ-облучателя КД-33Л.

выход видимого света, который является мешающим фактором в процессе люминесцентного контроля, по возможности с минимальной потерей полезной энергии излучения. Эти фильтры также блокируют вредное излучение (излучение с длиной волны менее 320 нм). В соответствии с требованиями ГОСТ 18442 и ISO 3059, при осмотре контролируемой поверхности с использованием УФ-облучателей доля видимого света на исследуемом участке не должна превышать 30 и 20 лк соответственно. Так как величина интенсивности как от ультрафиолетового, так и от видимого света регулируется различными нормативными документами при осмотре на контролируемой поверхности, она также должна быть установлена для каждой лампы в разрешенном диапазоне УФ-облучения. С увеличением облученности доля видимой составляющей в спектре линейно возрастает. В литературных источниках и в паспорте на УФ-лампы данная информация (для всего разрешенного диапазона интенсивности) в соответствии с требованиями НД отсутствует.

С этой целью была определена доля видимого света для всех рассматриваемых типов источников в зависимости от величины облученности, создаваемой УФ-лампами. Измерения величины освещенности видимой части спектра ( $I$ ) различных УФ-облучателей проводились при различной энергетической освещенности от 1000 до 6000 мкВт/см<sup>2</sup> с использованием аттестованного люксметра.

Современные люксметры обеспечивают надлежащий диапазон чувствительности только для определенных длин волн, имеют неравномерный по чувствительности диапазон измерений освещенности от 380/400 до 760 нм с максимальной чувствительностью к излучению с длиной волны 555 нм и с минимальной по границам видимого диапазона. Проводя измерения люксметром доли видимого излучения при высокой интенсивности УФ-излучения, авторы понимают,

что проводят измерения с минимальной чувствительностью и получают минимально возможные определяемые значения с низкой точностью измерения соответственно. Для качественного сравнения различных УФ-облучателей на наличие электромагнитного излучения в области видимого света в большей или меньшей степени полученных экспериментальных данных достаточно и очень наглядно при выборе источников. Результаты измерений показаны на рис. 7 и в табл. 4 в виде линейных экспериментальных зависимостей освещенности видимого света от ультрафиолетовой облученности  $I(E)$  для всех типов рассматриваемых УФ-облучателей.

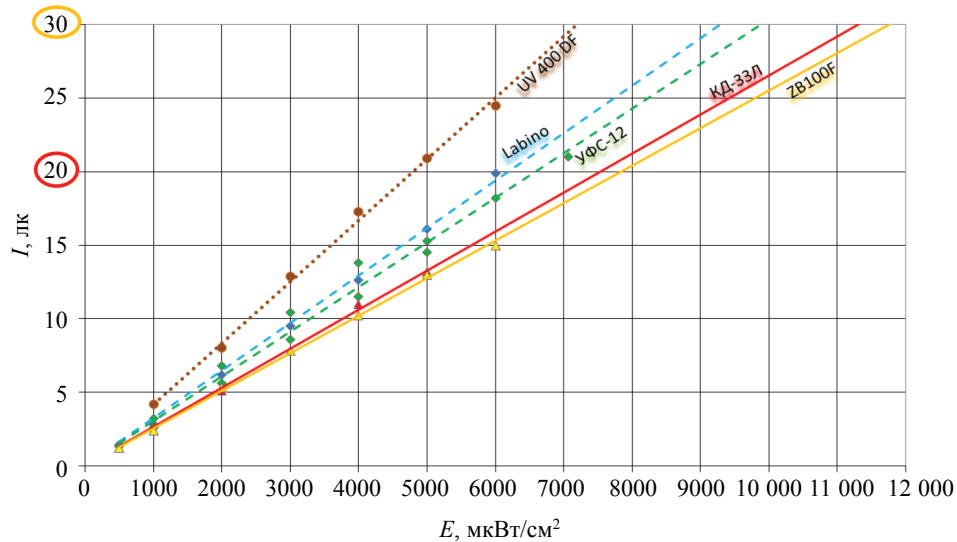


Рис. 7. Вид полученной линейной экспериментальной зависимости  $I(r)$ .

Таблица 4

Доля видимой части света от УФ-облучателей при интенсивности освещения, установленной согласно требованиям ГОСТ 18442 и ISO 3059

Наименование УФ-источника	$I_{(2000-3000 \text{ мкВт/см}^2)}$ , ЛК	$I_{(1000-5000 \text{ мкВт/см}^2)}$ , ЛК	$I(r)$	Доля видимого излучения в УФ-спектре, %
ATG UV 400 DF	8,4—12,6	4,2—21,0	$I = 0,0042 \cdot r$	28,3
Labino Torsh Light UVG 2 Floodlight	6,4—9,6	3,2—16,0	$I = 0,0032 \cdot r$	10,5
Элитест УФС-12 Black Light	6,2—9,3	3,1—15,5	$I = 0,0031 \cdot r$	3,7
КД-33Л	5,4—8,1	2,7—13,5	$I = 0,0027 \cdot r$	12,1
Magnaflex ZB100F	5,2—7,8	2,6—13,0	$I = 0,0026 \cdot r$	1,3

В табл. 4 из спектральных характеристик ламп получены более точные значения в процентах доли видимого излучения в эмиссионном спектре УФ-источника, а именно как отношение площади излучаемого спектра в диапазоне УФ-А-источника к площади излучения в видимом диапазоне.

Из рис. 7 и табл. 4 видно, что наибольшее количество энергии в видимой области спектра при заданной облученности излучается УФ-лампой ATG UV 400 DF, а наименьшее количество излучается УФ-лампой Magnaflux ZB100F и Элитест УФС-12. Стоит отметить, что рабочий диапазон УФ-облученности (20 лк) для УФ-лампой ATG UV 400 DF содержит долю видимой части света, превышающую 20 лк.

### Качественная оценка результатов люминесцентного контроля

Для оценки полученных выше энергетических и спектральных характеристик источников УФ-облучения проведены экспериментальные исследования по обнаружению производственных и эксплуатационных дефектов на этапе осмотра результатов люминесцентного контроля поверхностей образцов и деталей с использованием набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 1 — ОВ.

Для данных исследований были подобраны образцы [25, 26] и детали с различными конструктивными особенностями и типами дефектов на их поверхности, такие как:

№ 1 — плоский образец с эксплуатационными дефектами типа трещина малоциклового усталости (МЦУ);

№ 2 — плоский образец с производственными дефектами типа неметаллическое включение и пора;

№ 3 — образец сварного шва, полученный с использованием АрДЭС, с производственными дефектами типа горячая трещина и пора;

№ 4 — лопатка ГТД с эксплуатационной трещиной в замковой части;

№ 5 — проушина с окружной трещиной в отверстии;

№ 6 — образец с отверстием диаметром 6,5 мм с трещиной МЦУ на внутренней поверхности;

№ 7 — образец с отверстием диаметром 11,0 мм, содержащим трещину МЦУ на внутренней поверхности.

При выполнении работ использовалось оборудование, в том числе ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ». Контроль образцов и деталей проводился по технологическим режимам, приведенным в ОСТ 1 90282. Результаты контроля оценивали различные дефектоскописты в соответствии с требованиями по освещенности ГОСТ 18422 для наборов по 1-му классу чувствительности с использованием различных передвижных и переносных УФ-облучателей. Результаты регистрировали с использованием фоторегистрирующего устройства при фиксированном угле съемки относительно оси ультрафиолетового потока с интенсивностью излучения в местах расположения дефекта на поверхности образца около 3000 мкВт/см<sup>2</sup>. Баланс цветопередачи, при фиксации результатов капиллярного люминесцентного контроля с использованием различных источников, не изменялся. Результаты контроля показаны в табл. 5. Дефекты, обнаруженные дефектоскопистами, обведены пунктиром.

Анализ полученных результатов показал:

при осмотре поверхностей образцов № 2 и № 3 и деталей в УФ-свете с использованием всех ртутных и светодиодных ультрафиолетовых источников производственные дефекты обнаружены в полном объеме.

при осмотре поверхностей образцов и деталей в УФ-свете с использованием светодиодных источников трещины МЦУ различного размера (длиной от 0,5 мм) выявлены в полном объеме. А при осмотре с использованием ртутных газоразрядных ламп поверхностей плоских образцов № 1 и внутри отверстия № 7 не обнаружены трещины МЦУ длиной от 0,5 до 2,0 мм.

Дефектоскопистами было отмечено что:

при использовании лампы КД-33Л зафиксирован неравномерный фиолетовый фон, который приводил к затруднению при расшифровке и регистрации дефектов;




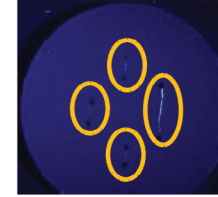



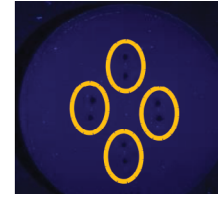
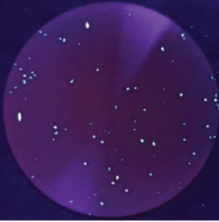

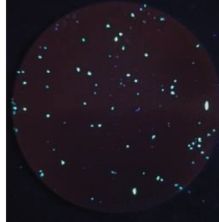









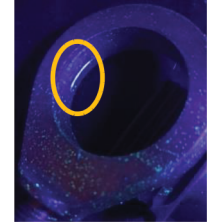


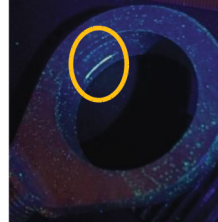
при использовании светодиодных ламп Элитест и Labino индикации от всех дефектов были более яркие и контрастные при наличии незначительного равномерного темно синего фона, который дефектоскописты посчитали за благоприятный и удобный фактор;

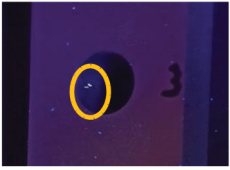

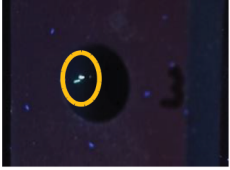
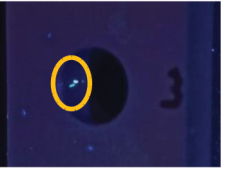
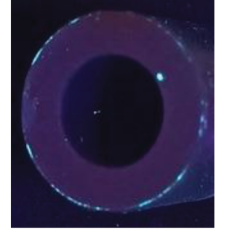
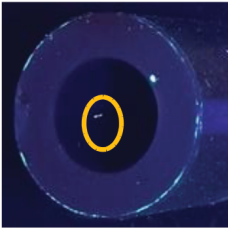
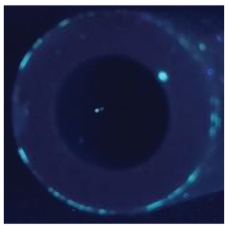
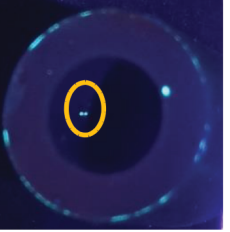
при использовании лампы Magnaflux на исследуемой бездефектной поверхности регистрируется самый темный «бархатный» фон;

при использовании лампы Labino для обеспечения требуемой освещенности, дефектоскопистам было неудобно держать данный источник на расстоянии  $\approx 925$  мм до ОК, чтобы обеспечить заданную освещенность.

Таблица 5

**Результаты капиллярного контроля образцов и деталей с различными дефектами**

Объект контроля	УФ-облучатели			
	КД-33Л	Элитест УФС-12 Black Light	Magnaflux ZB100F	Labino Torch Light UVG 2 Floodlight
№ 1				
№ 1				
№ 2				
№ 3				
№ 4				
№ 5				

Объект контроля	УФ-облучатели			
	КД-33Л	Элитест УФС-12 Black Light	Magnaflux ZB100F	Labino Torch Light UVG 2 Floodlight
№ 6				
№ 7				

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя полученные экспериментальные результаты контроля, а также энергетические и спектральные характеристики, можно установить, что все источники обеспечивают выявление дефектов с шириной раскрытия 1 мк, но наилучшие результаты, как и следовало ожидать, получены при наличии значительной доли видимой части спектра в УФ-излучении лампы КД-33Л, сформированной, в том числе, в отдельном характерном эмиссионном пике.

Обеспечить оптимальное расстояние, при котором электромагнитное излучение напрямую не будет попадать в глаза контролера (для переносных и передвижных от 30 до 40 мм, а для стационарных от 40 до 50 мм) при осмотре в УФ-свете деталей, возможно не для всех УФ-облучателей с обеспечением требований по освещенности, установленной стандартами ГОСТ 18442 и ISO 3059, а именно Labino Torch Light UVG 2 Floodlight и ATG UV 400 DF.

Наличие незначительного количества доли видимого излучения в спектре УФ светодиодных ламп приводит к формированию темно-синего равномерного «бархатного» фона, что благоприятно сказывается на обнаружении дефектов, имеющих маленькую протяженность.

Наличие регулировки интенсивности УФ-излучения в облучателе Элитест УФС12 Black Light позволяет значительно увеличить диапазон рабочих расстояний, одновременно обеспечивая требования как отечественных, так и зарубежных стандартов.

Рабочие диаметры пятна всех УФ-источников обеспечивают контроль оптимального размера участка. Наибольший размер данного параметра получен с использованием лампы УФС12 Black Light, что является важной характеристикой, влияющей на производительность контроля.

## ВЫВОДЫ

Показан новый подход оценки современных ультрафиолетовых источников излучения, используемых при проведении люминесцентного капиллярного контроля на этапе осмотра исследуемых поверхностей в УФ-свете на наличие дефектов с учетом установленных требований зарубежными и отечественными стандартами.

Установлено, что для сравнения различных УФ-облучателей их характеристик, указанных в технической документации (паспортах или руководствах по эксплуатации) для определения эффективности их использования с точки зрения выявляемости дефектов, для дефектоскопистов недостаточно.

Для оценки эффективности использования современных источников УФ-излучения в соответствии с требованиями по ультрафиолетовой облученности, установленными в нормативно-

технических документах, необходимо проведение дополнительных экспериментальных измерений, таких как:

энергетические и спектральные характеристики источников УФ-облучения (форма спектральной кривой от 320 до 410 нм, ширина спектра на полувысоте, доля видимого излучения в УФ-спектре, наличие дополнительных характерных пиков и др.);

граничные условия осмотра — диапазон рабочих расстояний ( $R$ ) и рабочий диаметр пятна ( $D$ ); зависимости энергетической освещенности ультрафиолетового излучения от расстояния  $E(r)$  в оптимальном диапазоне от 500 до 6000 мкВт/см<sup>2</sup>;

зависимости освещенности видимой света от ультрафиолетовой облученности  $I(E)$  в оптимальном диапазоне от 500 до 6000 мкВт/см<sup>2</sup>.

Установлено, что светодиодные УФ-лампы со светофильтром и регулировкой интенсивности излучения обеспечивают наилучшие условия контроля и обнаружения дефектов.

Полученные результаты могут быть полезны не только для дефектоскопистов, но и для производителей УФ-источников, применяемых при капиллярном контроле, которые могут их учитывать в паспортных данных или руководствах по эксплуатации как характеристики, показывающие их конкурентное преимущество.

Данный подход позволит сформировать для дефектоскопистов недостающие характеристики по всем используемым источникам УФ-облучения, необходимые для оптимального выбора УФ-ламп и обеспечения максимальной чувствительности обнаружения дефектов при осмотре в УФ-свете с учетом требований нормативных документов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3—33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33
2. Каблов Е.Н., Шевченко Ю.Н., Кожневиков А.Н. Отраслевые стандарты — основа качества авиационной техники // *Сталь*. 2008. № 8. С. 121—122.
3. DOT/FAA/AR-01/95 Study of the Factors Affecting the Sensitivity of Liquid Penetrant Inspections: Review of Literature Published from 1970 to 1998. January 2002. 51 p.
4. Скоробогатько Д.С., Головков А.Н., Кудинов И.И., Куличкова С.И. К вопросу подготовки поверхности в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн.* 2021. № 4. Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 24.12.2021) DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106
5. Кудинов И.И., Головков А.Н., Куличкова С.И., Скоробогатько Д.С. Оценка эффективности применения различных способов интенсификации процесса капиллярного контроля с применением отечественного набора дефектоскопических материалов // *Дефектоскопия*. 2019. № 11 С. 59—66. DOI: 10.1134/S0130308219110071
6. Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Kulichkova S.I., Skorobogatko D.S. Research of Defectoscopic Properties of Powder Compositions for Increasing Efficiency and Reliability of Penetrant Testing of Complex Shaped Parts // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 3. P. 291—297. DOI: 10.1134/S1061830920030079
7. Карякин А.В., Боровиков А.С. Люминесцентная и цветная дефектоскопия М.: Машиностроение, 1972. 239 с.
8. Gram B. Mechanisms Contributing to Fluorescence and Visibility of Penetrants / *Proceedings of the Fifth International Conference on Nondestructive Testing*. May 1967. P. 225—233.
9. Глазков Ю.А. Оценка качества материалов для капиллярной дефектоскопии по видимости индикаторных рисунков дефектов // *Дефектоскопия*. 2012. № 4. С. 17—29
10. Alburger J.R. Dimensional Transition Effects in Visible Color and Fluorescent Dye Liquids / *Proceedings, 23rd Annual Conference, Instrument Society of America*. V. 23. Part I. P. 564.
11. Alburger J.R. Signal-to-Noise Ratio in the Inspection Penetrant Process // *Materials Evaluation*. 1974. September. P. 193—200.
12. Alburger J.R. Fluorescent Brightness Measurement // *Materials Evaluation*. 1966. November. No. 11. V. 24. P. 624—630.
13. Holmgren V., Sebring P., Robinson S. Measuring Fluorescent Brightness Then and Now. ASNT Fall Conference and Quality Testing Show Paper Summaries, Pittsburgh, Pennsylvania, October, 1997. P. 120—122.
14. Sebring P. Fluorescent Spectrophotometers for Measuring Penetrant Brightness / presented at the ASNT Fall Conference and Quality Testing Show Paper Summaries, Pittsburgh, Pennsylvania, October, 1997.
15. Калиниченко А.Н., Соснин Э.А., Авдеев С.М., Калиниченко Н.П., Истомин К.А. Особенности применения эксилламп в люминесцентном методе капиллярного контроля // *Дефектоскопия*. 2017. № 11. С. 51—56.

16. *Lee John, Piotrowski David, Loggins Brad, Talbott Scott.* Delta TechOps Investigation of High Intensity UV Lights on FPI and MPI, 2014, September 24.
17. *Чертищев В.Ю.* Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // *Авиационные материалы и технологии.* 2018. № 3. С. 65—79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79
18. *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В.* Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // *Дефектоскопия.* 2021. № 1. С. 64—71. DOI: 10.31857/S0130308221010073
19. MIL-HDBK-1823A «Nondestructive evaluation system reliability assessment» / Департамент обороны США, 2009 г.
20. *Rummel W.D.* Probability of Detection as a Quantitative Measure of Nondestructive Testing End-To-End Process Capabilities // *Materials Evaluation.* 1998. January. P. 35.
21. ГОСТ 18442—80 «Неразрушающий контроль. Капиллярные методы». Издательство стандартов. 1987. 24 с.
22. ISO 3059:2001 Non-destructive testing — Penetrant testing and magnetic particle testing — Viewing condition. 2011. 12 p.
23. *Демин В.В., Половцев И.Г.* Фотометрия и ее применения. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2017. 344 с.
24. What-is-ASTM-E3022-18-and-why-do-we-need-it <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://labino.com/wp-content/uploads/2020/05/What-is-ASTM-E3022-18-and-why-do-we-need-it.pdf&ved=2ahUKEwillNug4fv0AhVeSPEDHa6bDnQQFnoECAkQAQ&usg=AOvVaw2rX9ZQRRdnbTdRC7WWSU0n> (дата обращения 10.12.2021).
25. *Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С.* Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2019. № 11. Ст. 95. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103
26. *Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б.* Новые этапы развития Испытательного центра // *Авиационные материалы и технологии.* 2017. № S. С. 460—468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468