

УДК 683.3.05+ 62-408.8+ 621.9.019

СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ© 2015 С.Р. Абульханов¹, С.И. Харитонов²¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)²Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Поступила в редакцию 06.04.2015

Существенные различия условий эксплуатации светотехнических устройств различного назначения приводят к необходимости оптимизации не только их конструкции, но и к оптимизации технологического процесса их изготовления. Для выявления в результате натурных испытаний наиболее критичных природных и техногенных факторов, влияющих на надёжность осветительных устройств, необходимы длительные и затратные испытания, например, на треке. Такие испытания целесообразно проводить на стенде. В работе предлагается конструкция специального стенда, позволяющего не только изменять режимы воздействия требуемых факторов, но и их сочетания, а также временные последовательности и длительности их воздействия.

Ключевые слова: стойкостные натурные испытания, рассеиватель светотехнического устройства, природные и техногенные факторы воздействия, оптическая поверхность

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация оптических приборов приводит к изменению микрогеометрии наружных поверхностей элементов оптических систем. Причиной снижения оптической эффективности является появление микронеровностей внешней поверхности оптических устройств, которые происходят в результате контакта с окружающей средой. Особое воздействие внешней среды на качество оптической поверхности светотехнических устройств происходит при их эксплуатации на больших скоростях, характерных для светосигнальных огней самолетов, автомобильных фар и прожекторов железнодорожных локомотивов. Поэтому исследования, связанные с увеличением времени эксплуатации элементов, созданных для преобразования световых пучков, являются актуальными для многих отраслей человеческой деятельности.

Причины, влияющие на эффективность оптических элементов, можно разделить на две группы: эрозия поверхности и пластические деформации на поверхности и в теле оптического элемента. Явление эрозии **может быть обусловлено** процессами взаимодействия поверхности оптического элемента с окружающей средой, физическими условиями эксплуатации (температура, давление, радиационное воздействие, воздействие химических соединений),

Абульханов Станислав Рафаелевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов, докторант. E-mail: abulhanov58@mail.ru
Харитонов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.
E-mail: prognoz@smr.ru

а также механическими факторами (массовый износ поверхности и др.).

Пластические деформации, распределённые по телу оптического элемента, могут образовываться на этапах изготовления и эксплуатации оптического элемента. В теле оптического элемента постоянно, но с разной скоростью для различных направлений, происходит перераспределение пластических деформаций, которое со временем приводит к исчерпанию на некоторых участках пластических свойств материала оптических элементов. Факторами, способствующими исчерпанию пластических свойств материала поверхностного слоя рассеивателей осветительных устройств, могут быть различные частицы. Во время удара микрочастицы материала рассеивателя под ней сжимается, а по периметру зоны удара растягивается, в результате многократных ударов материал поверхности теряет способность к деформированию. Источником деформаций элементов оптической системы транспортного средства могут быть также вибрации во время движения.

На поверхности частиц, воздействующих на рассеиватель оптического элемента, может находиться жидкость различного химического состава. В результате ударов частиц молекулы такой жидкости могут проникать в возникающие микротрещины, что увеличивает скорость деградации поверхности оптического элемента.

Обобщение и *сопоставление* различных причин возникновения пластических деформаций в оптических элементах автомобилей и железнодорожных локомотивов на основе натурных испытаний с результатами, полученными на твердотельных моделях, показало их хорошее совпадение для макроразрушений [1-4]. Модели-

рование появления микротрещин на поверхности и по телу оптического элемента на твердотельных моделях [5, 6] оказалось невозможным по причине отсутствия теоретической модели возникновения микротрещин в материалах с различными физическими свойствами в результате случайного импульсного воздействия частиц малой массы. Приемлемой альтернативой определения стойкости наружной поверхности рассеивателя фары могут быть экспериментальное моделирование на специальном стенде, позволяющем за короткий срок воссоздать реальное воздействие внешней среды в ходе эксплуатации светотехнических устройств.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Внешняя поверхность рассеивателей автомобильных фар или железнодорожных прожекторов подвергается воздействию природных и техногенных факторов. К первым относятся температурный фактор (время года), давление набегающего потока воздуха, механическое воздействие частиц различной формы, размеров и твердости (например, насекомые, песчинки или частички льда). К техногенным факторам относится воздействие жидкостью, содержащей различные химические ингредиенты (растворы солей, щелочей и кислот, а также, например, реагенты для борьбы с гололедом и т.п.).

При этом частицы, воздействующие на поверхность рассеивателя осветительного устройства, могут быть сухими и в разной степени влажными.

Натурное моделирование сочетаний различных природных и техногенных факторов, действующих с различной интенсивностью, в разной последовательности и в разных сочетаниях с другими факторами, позволит выявить некоторую комбинацию последних, которая наиболее критична к изменению качественных параметров поверхностного слоя оптически прозрачной поверхности.

Результаты натурального моделирования воздействия различных природных и техногенных факторов на внешнюю поверхность рассеивателя фары позволят разработать новые и оптимизировать известные конструкции осветительных устройств различного назначения. В этом случае обоснованные проектно-конструкторские решения возможны при наличии информации о характере остаточных напряжений и эпюрах микротвердости поверхностного слоя, а также о параметрах шероховатости поверхности рассеивателя фары. При этом следует иметь в виду, что натурные испытания рассеивателей источников света, находящихся в эксплуатации, дело чрезвычайно длительное и затратное, а известные методы и технологии создания нанопор

[7-9] и микронеровностей [10-12] невозможно использовать для имитации воздействия внешней среды на работающее светотехническое устройство. Существующие методы проектирования осветительных устройств и оптических систем [13-24] не позволяют промоделировать воздействие внешней среды в рамках вычислительного эксперимента. Известные экспериментальные установки для испытаний светотехнических приборов [25-28] также не позволяют имитировать и учесть воздействие окружающей среды и условий эксплуатации на исследуемое устройство.

Все указанные выше обстоятельства привели к необходимости разработки конструкции стенда, на котором возможно управление воздействием ряда природных и техногенных факторов на оптически прозрачную поверхность образца, в частности рассеивателя фары.

КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Практический опыт эксплуатации и натурные испытания светотехнических устройств транспортных средств показали, что не существует общих рекомендаций по выбору оптимальной формы поверхности и материала рассеивателя. Оптимальным может быть выбор, учитывающий конкретные условия эксплуатации транспортного средства. При этом следует учитывать физикотехнические параметры материала рассеивателя и особенности технологических методов формирования качественных параметров поверхностного слоя оптической поверхности.

Для имитации различных условий эксплуатации осветительных устройств конструкция стенда предусматривала два одинаковых инжекторных сопла (далее ИС), которые имели возможность двигаться относительно друг друга и относительно исследуемой поверхности рассеивателя по заранее согласованным траекториям. ИС обеспечивают направление движения и различную скорость частицам, воздействующим на исследуемую оптическую поверхность. Кроме того сопла могут перемещаться внутри некоторого пространства. Оси симметрии ИС могут изменять во времени свои азимутальные углы наклона.

Движущиеся частицы могут быть сухими, а также в разной степени влажными. При этом жидкость, которая используется для смачивания, может состоять из различных ингредиентов. Во время испытаний жидкости, распыляемые вместе с частицами через ИС, имеют возможность менять свою температуру. В разных соплах жидкость может иметь различный химический состав и температуру. Концентрация растворов, выбрасываемых через ИС, может меняться во времени.

Частицы, воздействующие на поверхность

рассеивателя, могут иметь различную прочность, размеры и природу (кварцевый песок, глиняная супесь, частички льда, взвесь чёрнозёмных или каштановых почв и др.). Плотность частиц в воздушном потоке также можно регулировать.

На рис. 1 показаны возможные перемещения в пространстве сопел, а также технические средства, позволяющие менять характеристики распыляемых частиц и жидкости. Конструкция стенда защищена патентом РФ на изобретение [29]. Новизна стенда заключалась в возможности управлению различными характеристиками воздушного потока. Реализовать это физически можно большим количеством инженерных решений, которые сами по себе давно известны. Новизна стенда, как устройства, состоит в новой взаимосвязи известных инженерных решений, которые обеспечивают новые потребительские (эксплуатационные) свойства пескоструйной установки.

Воздушные компрессоры 4 и 5 создают воздушные потоки в каждом из сопел 1, при этом давление в потоке воздуха управляется заслонками 6 и 7. Другая пара компрессоров 8 и 9 создает избыточное давление соответственно в герметичных ёмкостях 10 и 11, в которых находятся предварительно загруженные абразивные частицы. Избыточное давление подаёт абразивные частицы через инжекционные отверстия сопел 1 в воздушный поток, направленный на поверхность рассеивателя 2. Давление в потоке воздуха

формирует определённый диапазон скоростей частиц. Ёмкости 12 и 13 предварительно заполняют жидкостями различного химического состава. Каждая ёмкость 12 и 13 имеет техническую возможность фиксированно менять температуру жидкостей. Нагрев осуществляется с помощью электронагревателей, а охлаждение – с помощью испарительного охладителя. Жидкость из ёмкостей 12 и 13 с помощью насосов соответственно 14 и 15 подаётся через инжекционные отверстия сопел 1 в сформированный воздушный поток. Положение в пространстве двух инжекционных сопел 1, а также поверхности рассеивателя 2 осуществляется с помощью зубчато – реечных передач (линейные перемещения) и редукторов (круговые перемещения).

При этом в конструкцию стенда был заложен модульный характер, что позволяет изменять по мере необходимости характер воздействия различных факторов на исследуемую оптическую поверхность. Как дополнительные опции стенда к его конструкции прилагаются дополнительные приспособления, способные:

- придавать сформированному воздушному потоку сложную траекторию, изменяющуюся во времени и осуществляемую с помощью двух вентиляторов, имеющих возможность линейного перемещения в двух координатах (на рис. 1 не показаны);
- перемешивать абразив с жидкостью предварительно в специальных ёмкостях (на рис. 1

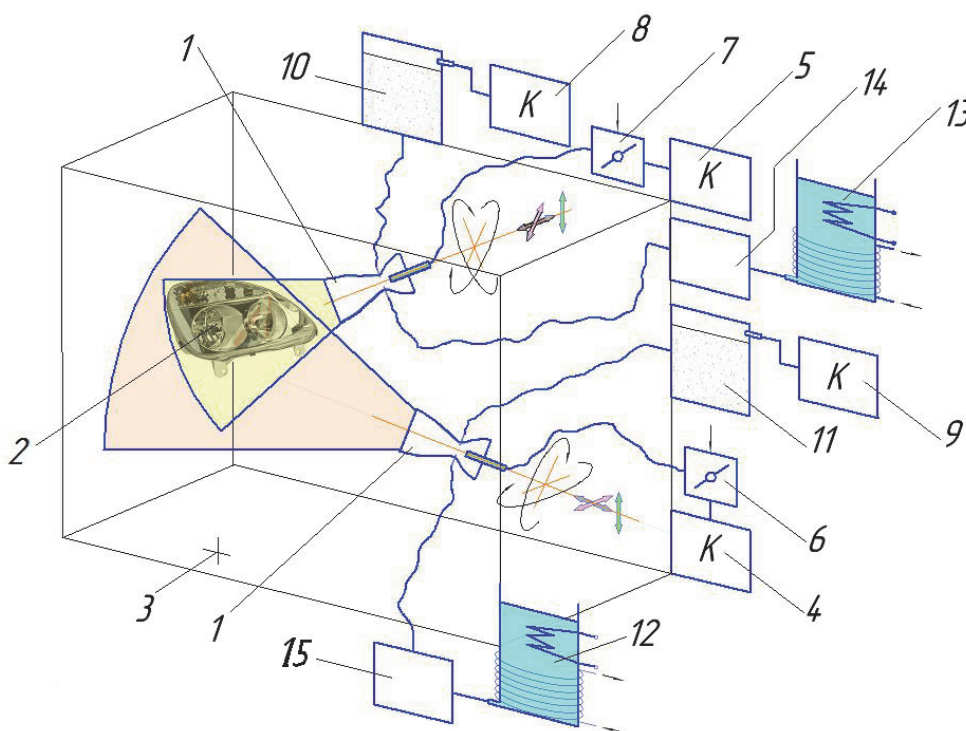


Рис. 1. Стенд для стойкостных испытаний поверхности рассеивателей осветительных устройств: 1 – два инжекторных сопла; 2 – исследуемая оптическая поверхность светорассеивателя; 3 – область допустимых движений сопел 1; 4 и 5 – воздушные компрессоры; 6 и 7 – управляемые заслонки; 8 и 9 – воздушные компрессоры; 10 и 11 – герметичные емкости с абразивными частицами; 12 и 13 – емкости для жидкостей, включающих в себя различные ингредиенты, с возможностью повышения или понижения температуры жидкостей; 14 и 15 – насосы

не показаны), в которых производится барботирование компонент, перемещаемых вместе с воздушным потоком;

- загружать в ёмкости с жидкостью различное количество химических ингредиентов, а также различное количество и различные фракции абразива в определённой временной последовательности;

- управлять стендом либо вручную непосредственно оператором в процессе проведения испытаний, либо автоматически, в случае, когда процесс воздействия на оптическую поверхность различных факторов предварительно программируется.

Рассмотрим возможности испытаний светорассеивателя применительно к двум экстремальным условиям эксплуатации осветительных устройств: заполярья и пустыни.

Для заполярья характерными природными факторами являются низкие температуры. Техногенные факторы при этом практически отсутствуют. Внутренняя поверхность рассеивателя при этом испытывает нагрев со стороны лампы накаливания. Внешняя сторона рассеивателя может быть охлаждена до -45°C и ниже. При эксплуатации автомобиля или локомотива на внешнюю поверхность прожектора (фары) воздействуют частицы льда, движущиеся хаотично и с высокими скоростями. Кинетическая энергия таких частиц может быть достаточной для того, чтобы при ударе о внешнюю поверхность фары частично лёд перешёл в жидкую фазу. В этом случае на поверхность отражателя действует преимущественно нормальная (гидравлическая) нагрузка со стороны летящих ледяных частиц. Моделирование, на стенде движения ледяных частиц со скоростями недостаточными для преобразования ледяных частиц в жидкость при ударе о рассеиватель, показало, что форма наружной поверхности рассеивателя мало влияет на эрозию оптической поверхности. В этом случае стекло, как материал рассеивателя, предпочтительней в сравнении с пластическими массами.

Для эксплуатации светотехнического устройства в условиях пустыни характерны нулевая влажность, перепад температур от 0 до $+50^{\circ}$. Цельсия и сильные порывы ветра с частицами песка. Движение воздушных масс может менять своё направление, а также на поверхность рассеивателя может воздействовать одновременно несколько воздушных потоков. Результаты моделирования показали, что и в этом случае стекло в качестве материала рассеивателя предпочтительней. При этом наименьшая эрозия имеет место для наружной поверхности рассеивателя, имеющего незначительную отрицательную кривизну (вогнутость).

В ходе стойкостных испытаний оптических поверхностей с помощью разработанного стенда

возможен анализ сформированного микро рельефа в результате воздействия на поверхность различных факторов на различных режимах, сочетаниях и в различной временной последовательности. Для этого после испытаний на разработанном стенде для исследования получившейся оптической поверхности могут быть использованы специализированные системы технического зрения [30-32], датчики и трибометрические устройства [33-35]. Аналогичным образом могут быть исследованы эпюры распределения микротвердости и остаточные напряжения в поверхностном слое оптической поверхности рассеивателей. Использование этих данных позволит повысить надёжность при эксплуатации светотехнических устройств транспортных средств в различных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ возможностей стенда показал, что он позволяет гибко в режиме реального времени имитировать воздействие природных и техногенных факторов на оптические поверхности, в частности, от климатических условий пустынь до условий Заполярья. Результаты проведенных испытаний на стенде позволяют определить направления оптимизации конструкции и технологии изготовления рассеивателей осветительных устройств, применительно к конкретным условиям их эксплуатации. При этом результаты испытаний получаются за экономически приемлемое время.

Модернизация конструкции стенда позволит использовать его инженерные решения для определения эксплуатационных свойств и оптимизации конструкций осветительных устройств, используемых в условиях космоса, на самолётах различного назначения, на судах и подводных аппаратах и т.д.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абульханов С.Р. Построение аутентичной 3-D модели лобового фонаря электровоза серии ВЛ // Вестник СамГУПС. 2012. №3 (17). С. 81–86.
2. Абульханов С.Р., Лопатин Е.В. Виброустойчивость конструкции лобового фонаря электровоза серии ВЛ // Вестник Транспорта Поволжья. 2013. №6 (42). С. 30–36.
3. Абульханов С.Р. Виброустойчивость конструкции лобового фонаря со светодиодными источниками света электровоза серии ВЛ // Вестник Транспорта Поволжья. 2014. № 1 (43). С. 44–51.
4. Абульханов С.Р., Скуратов Д.Л. Оптимизация конструкции железнодорожного прожектора в про-

- граммной среде ANSYS // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(2). С. 335–339.
5. *Зольников К.П., Уваров Т.Ю., Псахье С.Г.* Об анизотропии процессов пластической деформации и разрушения при динамическом разрушении // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 7. С. 1–7.
 6. *Казанский Н.Л., Колпаков В.А.* Эффект объемной модификации полимеров в направленном потоке низкотемпературной плазмы // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. № 9. С. 41–46.
 7. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трегуб В.И., Меженин А.В.* Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов // Компьютерная оптика. 2007. Том 31. № 2. С. 48–51.
 8. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Меженин А.В., Осетров Е.Л.* Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов // Компьютерная оптика. 2008. Том 32. № 3. С. 246–248.
 9. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трегуб В.И.* Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов // Компьютерная оптика. 2010. Том 34. № 4. С. 481–486.
 10. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Сойфер В.А., Соловьев В.С.* Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 91–93.
 11. *Волков А.В., Казанский Н.Л., Рыбаков О.Е.* Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 130–133.
 12. *Казанский Н.Л., Колпаков В.А.* Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220 с.
 13. *Голуб М.А., Казанский Н.Л., Сисакян И.Н., Сойфер В.А.* Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики // Автометрия. 1988. № 1. С. 70–82.
 14. *Голуб М. А., Казанский Н. Л., Сисакян И. Н., Сойфер В. А.* Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики // Компьютерная оптика. – 1990. – № 7. – С. 3–26.
 15. *Kazanskiy N.L., Kotlyar V.V., Soifer V.A.* Computer-aided design of diffractive optical elements // Optical Engineering. 1994. Vol. 33, № 10. P. 3156–3166.
 16. *Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A., Tzaregorodtzev A.Ye.* Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. 1995. Vol. 101, № 2. P. 37–41.
 17. *Казанский Н.Л.* Математическое моделирование оптических систем. Самара: СГАУ, 2005. 240 с.
 18. *Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G.* Influence of Vortex Transmission Phase Function on Intensity Distribution in the Focal Area of High-Aperture Focusing System // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2011. Vol. 20, № 1. P. 23–42.
 19. *Golovashkin D.L., Kazanskiy N.L.* Solving Diffractive Optics Problem using Graphics Processing Units // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2011. Vol. 20, № 2. P. 85–89.
 20. *Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Volotovskiy S.G.* Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system // Journal of Modern Optics. 2011. Vol. 58, № 9. P. 748–760.
 21. *Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Устинов А.В., Волотовский С.Г.* Линзакон: непараксиальные эффекты // Оптический журнал. 2011. Том 78, № 11. С. 44–51.
 22. *Кравченко С.В., Моисеев М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л.* Расчет осесимметричных оптических элементов с двумя асферическими поверхностями для формирования заданных распределений освещенности // Компьютерная оптика. 2011. Том 35, № 4. С. 467–472.
 23. *Aslanov E.R., Doskolovich L.L., Moiseev M.A., Bezus E.A., Kazanskiy N.L.* Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LED lighting systems // Optics Express. 2013. Vol. 21, № 23. P. 28651–28656.
 24. *Дмитриев А.Ю., Досколович Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л.* Аналитический расчёт преломляющих оптических элементов для формирования однопараметрических диаграмм направленности // Компьютерная оптика. 2014. Том 38, № 2. С. 207–212.
 25. *Волков А. В., Казанский Н. Л., Успенев Г. В.* Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОО // Компьютерная оптика. 1999, № 19. С. 137–142.
 26. *Казанский Н.Л.* Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58–77.
 27. *Казанский Н.Л.* Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Том 13, № 4. С. 54–62.
 28. *Kazanskiy N., Skidanov R.* Binary beam splitter // Applied Optics. 2012. Vol. 51, № 14. P. 2672–2677.
 29. *Абульханов С.П., Казанский Н.Л., Харитонов С.И.* Установка для измерения параметров оптически прозрачных поверхностей // Патент РФ на изобретение № 2489703 от 8.11.2011.
 30. *Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л.* Автоматизированное устройство для оценки степени чистоты подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 69–75.
 31. *Бородин С.А., Волков А.В., Казанский Н.Л.* Устройство для анализа нанощероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность // Оптический журнал. 2009. Том 76, № 7. С. 42–47.
 32. *Kazanskiy N.L., Popov S.B.* Machine Vision System for

- Singularity Detection in Monitoring the Long Process // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2010. Vol. 19, № 1. P. 23–30.
33. *Karpeev S.V., Pavelyev V.S., Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Gavrilov A.V., Eropolov V.A.* Fibre sensors based on transverse mode selection // *Journal of Modern Optics*. 2007. Vol. 54, № 6. P. 833–844.
34. *Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И., Кричевский С.В., Ивлиев Н.А.* Оптимизация параметров устройства трибометрического измерения чистоты поверхности подложек // *Компьютерная оптика*. 2005. № 28. С. 76–79.
35. *Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A., Kolpakov A.I., Krichevsky S.V., Ivliev N.A., Desjatov M.V.* Parameter Optimization of a Tribometric Device for Rapid Assessment of Substrate Surface Cleanliness // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. 2008. Vol. 17, № 2. P. 167–172.

TEST BENCH FOR DEFINITION OF STABILITY OPTICALLY TRANSPARENT SURFACES ON THE IMPACT OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS

© 2015 S.R. Abul'khanov¹, S.I. Kharitonov²

¹ Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

² Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara

Significant differences of the operating conditions of the lighting devices for different purposes lead to the necessity to improve not only their design, but also to the optimization of the technological process of their manufacture. To identify as a result of field tests of the most critical natural and man-made factors affecting the reliability of lighting devices required lengthy and costly trials, for example, on the track. Such tests it is advisable to spend on the test bench. We propose a special design of the test bench allows to change the mode of exposure of the required factors, and their combinations, as well as time sequence and duration of their impact.

Keywords: adjective full-scale tests, the lens of the lighting device, natural and induced impacts, the optical surface.