

УДК 620.179

Е.И. Косарина¹, А.В. Степанов¹, А.А. Демидов¹, О.А. Крупнина¹

СЕНСИТОМЕТР ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-88-94

Рассмотрены вопросы сенситометрии радиографических технических пленок. Показана особенность взаимодействия рентгеновского излучения с микрокристаллами в эмульсионном слое в отличие от взаимодействия излучения оптического диапазона. Исследованы варианты облучения эмульсионного слоя пленки таким образом, чтобы по продолжительности экспонирования и результатам измерения оптической плотности полученных с помощью сенситометра рентгенограмм можно было построить характеристическую кривую (ХК) радиографической пленки. Рассчитаны параметры двух вариантов работы сенситометра: при его поступательном и вращательном перемещении. Исследована возможность построения характеристических кривых при разных значениях напряжения на рентгеновской трубке. Определены зависимости среднего градиента, чувствительности, разрешающей способности от энергии рентгеновского излучения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: радиографическая техническая пленка, сенситометр, оптическая плотность, экспозиционная доза излучения, характеристическая кривая, средний градиент, чувствительность к излучению, разрешающая способность, специальные свойства.

This article is devoted to sensitometry of technical radiographic films. Features of the interaction of X-rays with microcrystals in the emulsion layer in contrast to the interaction of radiation in the optical range are shown. Variants of the emulsion film exposure are discussed so that the duration of exposure and the results of absorbance measurements obtained with the X-ray sensitometer, one can construct a characteristic curve of a radiographic film. The parameters of the two variants of Sensitometer with translational and rotational movement are calculated. The possibility of construction of the characteristic curves for different values of X-ray tube voltage is determined. It is possible to determine the relationship between mean gradient, sensitivity, resolution and the X-ray energy.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 2.3. «Methods of nondestructive researches and control» («The strategic directions of development of materials and their processing technologies for the period till 2030») [1].

Keywords: technical radiographic film, sensitometer, optical density, exposure dose of radiation, characteristic curve, mean gradient, sensitivity to radiation, resolution, spectral properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Для авиационной техники характерно разнообразие объектов как по размерам изделий и материалам, из которых они выполнены, так и по условиям их эксплуатации [1–4]. В процессе производства все ответственные изделия, согласно высоким требованиям, предъявляемым к качеству изделий авиационной техники, исследуют методом неразрушающего контроля (НК). Из всех видов НК наиболее широко применяем рентгеновский метод с регистрацией излучения на радиографическую пленку.

При неразрушающем контроле радиографическую пленку используют в качестве преобразователя радиационного изображения в оптическое. Эффективность преобразования зависит от

свойств пленки [5–8]. Многолетние испытания радиографических пленок, проводимые в ВИАМ, определяют их дефектоскопические свойства: контрастную чувствительность, разрешающую способность и зависимость от энергии излучения [8–11]. Сенситометрические свойства описывает так называемая характеристическая кривая (ХК) радиографической пленки [12, 13]. Для подтверждения заявленных фирмой-изготовителем сенситометрических свойств необходимо практически построить характеристическую кривую. Это возможно при наличии специального устройства – рентгеновского сенситометра.

Для радиографической пленки характеристическая кривая представляет собой зависимость

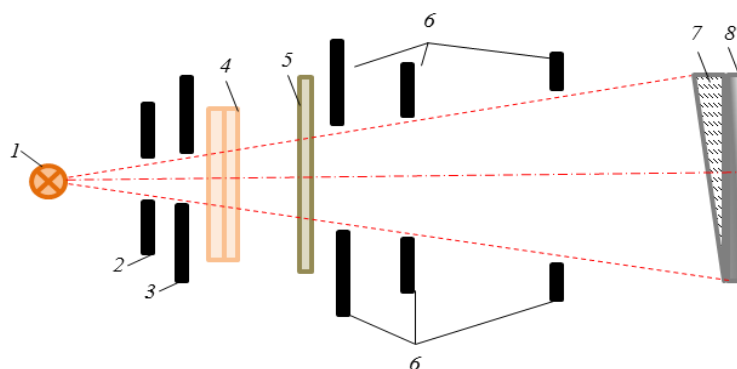


Рис. 1. Оптическая схема сенситометра ФСП-41: 1 – источник света; 2 – кожух затвора с отверстием; 3 – шторка затвора; 4 – светофильтр искусственного «солнечного» света; 5 – светофильтр для определения эффективной светочувствительности; 6 – диафрагмы; 7 – фотометрический клин; 8 – испытываемый фотоматериал



Рис. 2. Сенситограмма – последовательность фотографических оптических плотностей, соответствующих последовательности нормированных экспозиций испытываемого фотоматериала

оптической плотности от логарифма экспозиционной дозы излучения или логарифма относительной экспозиционной дозы излучения при постоянном напряжении на аноде рентгеновской трубки, равном 80 кВ. По ХК пленки определяют оптическую плотность вуали, чувствительность пленки к излучению, средний градиент, «широту» [14]. При напряжении 80 кВ на аноде рентгеновской трубки пленка обладает максимальной относительной чувствительностью [12]. Характеристическая кривая, построенная при напряжении 80 кВ, необъективно отражает свойства пленки, так как при проведении неразрушающего контроля изделий используют широкий диапазон анодных напряжений – от 20 до 400 кВ. В связи с этим важна информация о сенситометрических свойствах пленок в широком диапазоне анодных напряжений [15, 16].

Материалы и методы

Существуют сенситометры для определения сенситометрических характеристик цветных и черно-белых фото- и киноматериалов [17]. Схема устройства такого сенситометра (на примере прибора марки ФСП-41) показана на рис. 1. На подложке фотопленки с одной стороны нанесен тонкий слой эмульсии, так как она ориентирована на воздействие электромагнитного излучения в световом диапазоне. Этот факт определяет устройство сенситометра, предназначенного для построения характеристических кривых фотопленок.

В результате испытания фотоматериала посредством сенситометра получается снимок, представленный на рис. 2.

При радиографическом неразрушающем контроле на пленку воздействует излучение рентгеновского и гамма-диапазона, которое является проникающим. Микрокристаллы бромида серебра у радиографических пленок расположены в несколько слоев и нанесены на подложку с двух сторон, поэтому эмульсионный слой, чувствительный к излучению, значительно толще, чем у фотопленок. Оптическая плотность пленки формируется по всему объему эмульсионного слоя (рис. 3).

Сенситометры для технических радиографических пленок, сенситометрические характеристики которых имеют свои особенности, отсутствуют.

Из вышесказанного следует, что для построения ХК радиографической пленки необходим сенситометр, позволяющий получать рентгенограммы с разной оптической плотностью, причем для простого и нетрудоемкого построения характеристической кривой необходимо получить рентгенограммы таким образом, чтобы изменение оптической плотности было вызвано кратным изменением логарифма экспозиционной дозы излучения независимо от величины анодного напряжения.

Расчет параметров сенситометра, обеспечивающего зависимость оптической плотности от логарифма экспозиционной дозы излучения

Экспозиционная доза, излучаемая рентгеновским аппаратом с некоторыми постоянными значениями анодного напряжения (U) и анодного

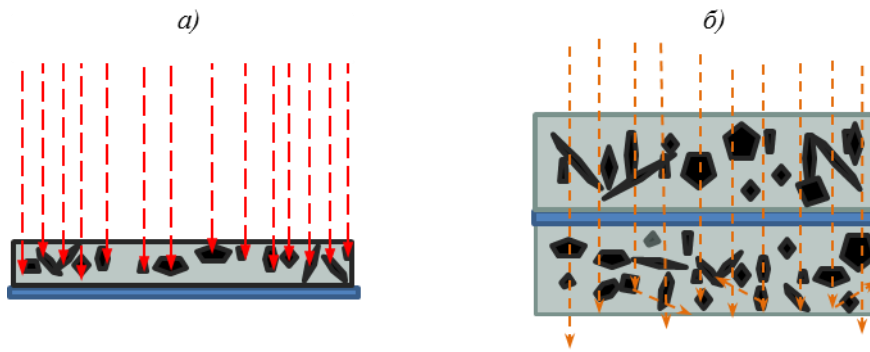


Рис. 3. Взаимодействие излучения оптического диапазона с фотослоем фотографической пленки (а) и излучения рентгеновского и гамма-диапазона со слоем радиографической пленки, чувствительным к излучению

тока трубки (I), пропорциональна времени (t), в течение которого он экспонирует радиографическую пленку, расположенную на некотором расстоянии (F) от анода, определяется соотношением

$$D_{\text{экс}} = n \frac{U^2 I t}{F^2}.$$

Оптическая плотность в результате экспонирования находится в логарифмической зависимости от величины дозы излучения.

При конструировании сенситометра в виде системы, состоящей из рентгеновской трубки, пластины с прорезями, линейно перемещающейся перед окном с постоянной скоростью, экспозиционная доза излучения, получаемая эмульсионным слоем пленки, пропорциональна длине окна (L) в свинцовом экране, поскольку $L=Vt$ (t – время экспонирования участка пленки, расположенного под окном длиной L_i). Эскиз свинцового экрана сенситометра показан на рис. 4, схема экспонирования радиографической пленки представлена на рис. 5.

Ширина окон в свинцовом экране должна быть такой, чтобы на их рентгенографическом изображении свободно размещался датчик денситометра с диаметром апертуры 2 мм. Длины окон должны быть кратны: $L_2=2L_1$; $L_3=3L_1$; ... $L_n=nL_1$. Такой способ получения сенситограммы имеет недостатки: при поступательном перемещении сенситометра относительно источника излучения меняется фокусное расстояние от источника излучения, а следовательно и экспозиционная доза, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения до пленки (рис. 6). Таким образом, оптическая плотность на рентгеновском снимке как функция экспозиционной дозы излучения зависит не только от продолжительности, но и от фокусного расстояния, которое при перемещении сенситометра меняется: $F_1 < F_2$.

Возможна другая конструкция сенситометра. Экран выполнен в виде вращающегося диска с дугообразными окнами, расположенными на разном расстоянии от центра (рис. 7). Ширина окон, так же как и в предыдущем случае, выбирается в

соответствии с размером датчика денситометра, а длина – несколько иначе. При вращении диска с некоторой постоянной угловой скоростью (α), линейная скорость некоторой точки диска, расположенной от центра на расстоянии, равном радиусу (R), рассчитывается как: $V=R\alpha$. Расстояние L , которое пройдет точка при вращении за некоторое время t , рассчитывается следующим образом:

$$L=Vt=R\alpha t.$$

Следовательно, участок пленки длиной L получит экспозиционную дозу, равную

$$D_{\text{экс}} = n \frac{U^2 I t}{F^2} = n \frac{U^2 I}{F^2} \cdot \frac{L}{R\alpha} = n \frac{U^2 I}{F^2 \alpha} \cdot \frac{L}{R}, \text{ или}$$

$$\frac{L}{R} = \text{const} \cdot D_{\text{экс}},$$

где безразмерная величина $\frac{L}{R}$ пропорциональна продолжительности экспонирования. Характеристическая кривая пленки представляет собой зависимость оптической плотности от десятичного логарифма экспозиционной дозы излучения: $S=S_0+\gamma \cdot \lg D_{\text{экс}}$, где S – оптическая плотность, Б; S_0 – вуаль пленки (оптическая плотность при отсутствии экспозиции, при $D_{\text{экс}}=0$). Для простого нетрудоемкого построения ХК необходимо, чтобы длины дугообразных окон L были пропорциональны десятичному логарифму экспозиционной

дозы излучения: $\frac{L}{R} = \lg D_{\text{экс}}$.

Таким образом, отношение длины окна к его радиусу должно подчиняться условию

$$\frac{L}{R} + \text{const} = k \cdot \lg \frac{L}{R},$$

где k – константа, принимающая значения: 1, 2, 3 и т. д.; const – некая постоянная, определяемая начальными условиями экспонирования, оптической плотностью вуали пленки и ее коэффициентом контрастности.

Такое уравнение нерешаемо аналитически. На рис. 8 показано графическое решение этого уравнения.

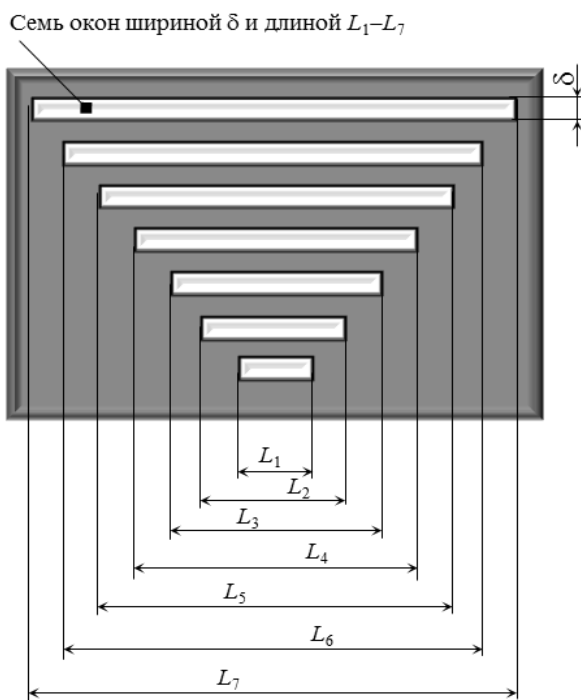


Рис. 4. Эскиз экрана сенситометра при линейном перемещении кассеты относительно источника излучения

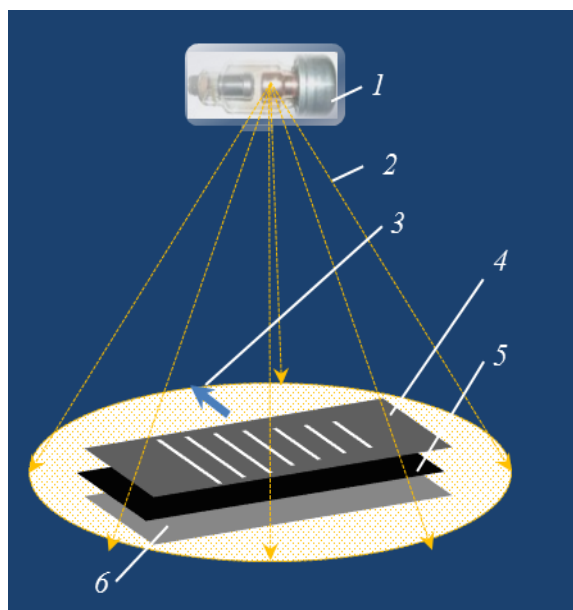


Рис. 5. Схема получения сенситограммы при экспонировании радиографической пленки в результате ее линейного перемещения относительно источника излучения: 1 – источник рентгеновского излучения; 2 – рентгеновское излучение; 3 – направление перемещения; 4 – свинцовый экран с окнами; 5 – кассета с радиографической пленкой; 6 – защитный экран от обратнорассеянного излучения

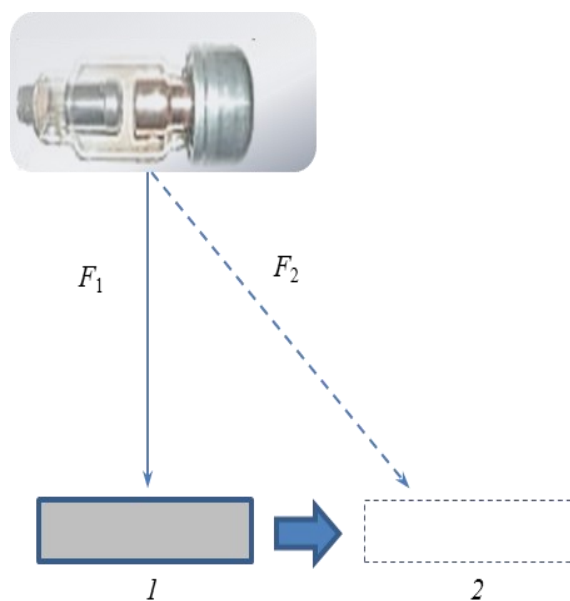


Рис. 6. Изменение фокусного расстояния при поступательном перемещении сенситометра относительно источника излучения (перемещение объекта контроля из положения 1 в положение 2)

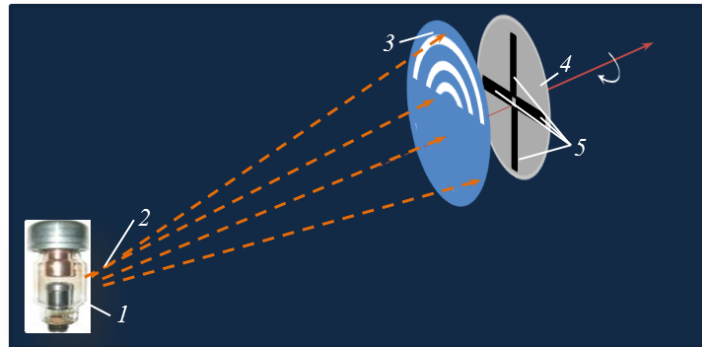


Рис. 7. Схема получения сенситограммы с помощью вращения радиографической пленки за сенситометром: 1 – источник рентгеновского излучения; 2 – рентгеновское излучение; 3 – неподвижный экран с дугообразными окнами; 4 – вращающийся диск с закрепленными на нем кассетами с радиографической пленкой 5

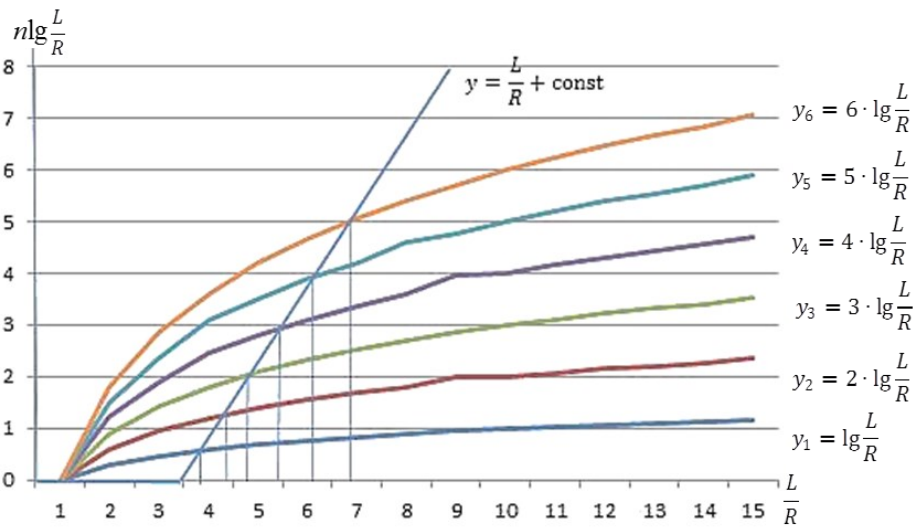


Рис. 8. Графическое решение уравнения $\frac{L}{R} + \text{const} = k \cdot \lg \frac{L}{R} + \text{const} = k \cdot \lg \frac{L}{R}$ для шести разных значений k

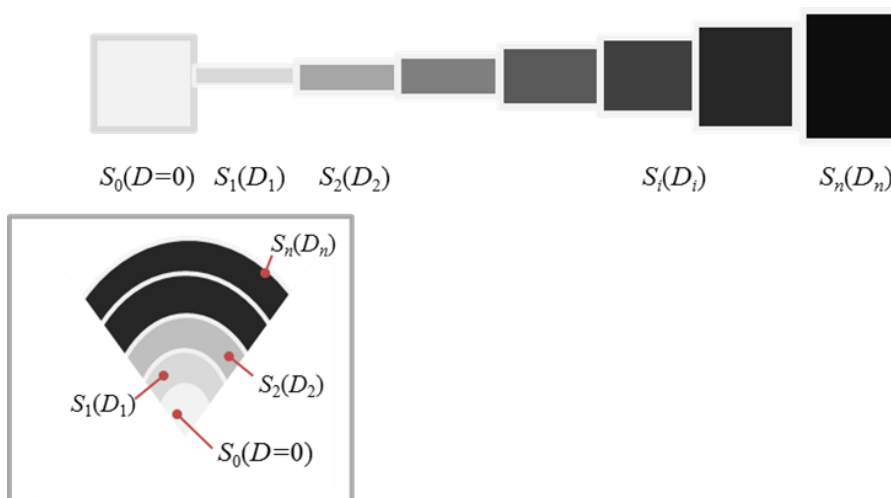


Рис. 9. Вид сенситограмм, полученных при поступательном (а) и вращательном (б) перемещении сенситометра

Точки пересечения графика $y = \frac{L}{R} + \text{const}$ с кривыми $y_k = k \cdot \lg \frac{L}{R}$ удовлетворяют условию $\frac{L}{R} + \text{const} = k \cdot \lg \frac{L}{R}$. С одной стороны, величина $\frac{L}{R}$ пропорциональна продолжительности экспозиции, т. е. экспозиционной дозе излучения; с другой – пропорциональна $\lg \frac{L}{R}$.

Результаты

Сенситограммы, полученные одним из вышеописанных способов, будут иметь вид, показанный на рис. 9. Сделав замеры оптической плотности, можно построить характеристическую кривую, определить средний градиент, чувствительность к излучению. Меняя анодное напряжение и сохраняя дозу излучения неизменной, определяем зависимость $S/D_{\text{всп}} = f(U)$, или «ход с жесткостью излучения». Она позволяет определить, как изменяются средний градиент, чувствительность пленки и оптическая плотность вуали при изменении анодного напряжения.

Обсуждение и заключения

Сенситометрические характеристики фотографических и радиографических пленок при воздействии излучения на их эмульсионный слой формируются по-разному, поэтому конструкции средств (сенситометры для фото- и радиографи-

ческих пленок), необходимых для их получения, принципиально отличаются друг от друга. Для получения характеристической кривой радиографической пленки невозможно использование фотографических сенситометров.

Рассмотрены конструктивные варианты сенситометров для радиографических пленок. Проведен расчет параметров сенситометров, при которых оптическая плотность экспонированных участков рентгенограммы испытываемой пленки с точностью до константы находится в логарифмической зависимости от экспозиционной дозы рентгеновского излучения.

Проведенный расчет универсален для любых энергий рентгеновского излучения, поэтому пригоден для сенситометрических испытаний радиографических технических пленок, работающих в диапазоне энергии рентгеновского излучения от 15 до 450 кэВ. Характеристические кривые, полученные при различных значениях энергии рентгеновского излучения, позволяют определить зависимость чувствительности пленки к излучению, среднего градиента и оптической плотности вуали от напряжения на рентгеновской трубке, так называемый «ход с жесткостью».

С помощью сенситометра для радиографических пленок можно легко определить принадлежность испытываемой пленки к классу качества.

На основании изложенного материала возможно изготовление сенситометра для радиографических пленок в лабораторных условиях, поскольку в промышленности они не производятся.

ЛИТЕРАТУРА

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 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение* // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнотермически сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11.
4. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМ // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. №5. С. 79–82.
5. Каблов Е.Н. *Современные материалы – основа инновационной модернизации России* // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
6. Гороховский Ю.Н., Левенберг Т.М. *Общая сенситометрия. Теория и практика*. М.: Искусство, 1963. 302 с.
7. Гороховский Ю.Н., Баранова В.П. Свойства черно-белых фотографических пленок. М.: Наука, 1970. 388 с.
8. Гороховский Ю.Н. *Спектральные исследования фотографического процесса*. М.: Физматгиз, 1960. 391 с.
9. Джеймс Т. *Теория фотографического процесса*: пер. с англ. Л.: Химия, 1973. 672 с.
10. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Требования к рентгеновскому контролю и качеству рентгенографических снимков в европейских нормах и российских стандартах // *Вестник МЭИ*. 2011. №4. С. 85–90.
11. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Разработка методики по испытанию радиографических пленок с целью определения целесообразности их применения в дефектоскопии // *Контроль. Диагностика*. 2011. №12. С. 65–67.
12. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Радиографические технические пленки РТ-К и РТ-7Т. Результаты их испытания // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 37–42.
13. Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Рентгеновский контроль крупногабаритных отливок сложной формы из сплавов

- группы «силумин» // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 55–58.
14. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1999. 104 с.
 15. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1998. 170 с.
 16. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
 17. BS EN 584-1:2006. Неразрушающий контроль. Промышленная радиографическая пленка. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленного радиографического контроля.
 18. BS EN 584-2. Неразрушающий контроль. Пленка для промышленного радиографического контроля. Часть 2. Контроль за проявлением пленки с помощью эталонных значений.
 19. Зернов В.А. Фотографическая сенситометрия. М.: Искусство, 1980. 351 с.