

Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-203-214

МИКРОДЕНСИТОМЕТР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛЯРНОСТИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Н.В. Осияненко¹, М.А. Далин¹, Е.И. Косарина¹, А.А. Демидов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены функциональная схема и внешний вид микроденситометра, посредством которого можно получить информацию о гранулярности радиографической пленки и определить ее принадлежность к тому или иному классу, регламентируемому ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023. Даны технологическая последовательность получения сенситограммы и массива оптической плотности, порядок его статистической обработки и вычисления гранулярности радиографической пленки. Проведена экспериментальная проверка разработанной технологии на сертифицированной радиографической пленке D5 Agfa с известным значением гранулярности. Показано полное совпадение заявленной и экспериментально полученной гранулярности.

Ключевые слова: рентгеновский неразрушающий контроль, радиографическая пленка, сенситограмма, гранулярность, линейная регрессия, фильтрация, статистическая обработка показаний

Для цитирования: Осияненко Н.В., Далин М.А., Косарина Е.И., Демидов А.А. Микроденситометр и определение гранулярности радиографических технических пленок // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 203–214. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-203-214.

Scientific article

MICRODENSITOMETER AND DETERMINATION OF GRANULARITY OF RADIOGRAPHIC TECHNICAL FILMS

N.V. Osiyanenko¹, M.A. Dalin¹, E.I. Kosarina¹, A.A. Demidov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the functional scheme and external appearance of a microdensitometer, which can be used to obtain information about the granularity of an X-ray film and determine whether it belongs to a specific class regulated by GOST R ISO 11699-1–2023. The technological sequence of obtaining a sensitogram and an optical density matrix, as well as the procedure for its statistical processing and the calculating the granularity of an X-ray film is given. An experimental verification of the developed technology was carried out on a certified D5 Agfa radiographic film with a known value of its grain size and full compliance with the declared and experimentally obtained grain size was obtained.

Keywords: X-ray non-destructive testing, radiographic film, sensitogram, granularity, linear regression, filtering, statistical processing of readings

For citation: Osiyanenko N.V., Dalin M.A., Kosarina E.I., Demidov A.A. Microdensitometer and determination of granularity of radiographic technical films. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 203–214. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-203-214.

Введение

Радиационный неразрушающий контроль с применением рентгеновского излучения, несмотря на трудоемкость и высокую себестоимость, остается обязательным условием в производстве большинства видов техники, в том числе авиационной. Основным видом радиационного неразрушающего контроля ответственных деталей авиационной техники, отливок и сварных соединений является радиографический контроль с использованием источников рентгеновского излучения и радиографической пленки в качестве преобразователя радиационного изображения. Проведение рентгенографического контроля строго регламентировано рядом нормативно-технической документации: источники рентгеновского излучения (рентгеновские аппараты) должны обеспечивать требования по режиму и параметрам контроля, а радиографическая пленка должна быть сертифицирована действующими стандартами ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 и ГОСТ Р ИСО 11699-2-2022 [1, 2]. Невыполнение требований нормативно-технической документации и неудовлетворительное качество пленки повышают риск пропуска дефекта и, как следствие, могут привести к выходу из строя ответственных деталей авиационной техники во время эксплуатации [3].

Согласно международному регламенту, технические радиографические пленки в соответствии с сенситометрическими и структурометрическими свойствами подразделяются на шесть классов. Класс радиографической пленки определяет Берлинский федеральный институт исследований и испытаний материалов (BAM). В зависимости от условий контроля необходимо использовать пленку строго определенного класса [4]. В связи с введением санкций в отношении Российской Федерации прекратился импорт сертифицированных радиографических технических пленок фирм Agfa, Fujifilm, Carestream, применявшихся для контроля качества изделий в авиационной отрасли. Взамен их на рынок поставляются радиографические технические пленки, не имеющие соответствующей сертификации. В настоящее время на территории России отсутствует сертифицирующий орган по контролю качества радиографических технических пленок для авиационной отрасли, усложнилось сертифицирование отечественных пленок [5–7].

Учитывая современную ситуацию, связанную с большим притоком на рынок радиографических пленок с неизвестными свойствами и недоступностью их сертификации, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны средства и технологии исследования сенситометрических и структурометрических свойств радиографических технических пленок с целью определения их принадлежности к соответствующему классу [8].

Состояние вопроса

Слой радиографических пленок, чувствительный к ионизирующему излучению, в том числе к свету, рентгеновскому и гамма-излучению, представляет собой эмульсию из микрокристаллов бромида серебра в желатине. Размер микрокристаллов колеблется в пределах одного микрометра, а их распределение и количество в эмульсионном слое стохастичны, а потому неравномерны. Ионизация микрокристаллов осуществляется случайно и зависит от их распределения, условий экспонирования, длины пробега электронов в эмульсионном слое, рассеянного излучения. В результате равномерно экспонированный эмульсионный слой после фотообработки получает неравномерную оптическую плотность, которая называется гранулярностью и физически представляет собой собственный шум радиографической пленки [9]. Согласно существующей классификации, регламентируемой ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023, каждый из шести классов радиографических пленок, помимо сенситометрических характеристик (чувствительность и средний градиент), имеет структурометрическую характеристику (граница по

гранулярности). Оценка гранулярности требует наличия высокоточных средств измерения, а обработка полученных данных – статистического анализа [8].

При рентгеновском контроле ответственных изделий, например объектов авиационной техники, необходимо использовать радиографическую пленку классов С1–С4, гранулярность которой не превышает 0,026 Б. Радиографические пленки, появившиеся на отечественном рынке после введения санкций, не всегда соответствуют заявленному классу. Поэтому для того, чтобы рекомендовать тот или иной тип пленки для рентгенографического контроля, необходимо проведение ее испытаний с целью определения структурометрических характеристик [10, 11].

Материалы и методы

Гранулярностью называют стохастические колебания оптической плотности радиографического снимка, полученного при равномерном экспонировании эмульсионного слоя радиографической пленки. Оптическая плотность – это степень потемнения радиографической пленки. При этом оптическая плотность, измеренная денситометром, светочувствительный элемент которого имеет апертуру $\varnothing 2$ мм, является диффузной (D_d), а измеренная микроденситометром, апертура которого не превышает $88,6 \times 88,6$ мм ($\varnothing 100$ мкм), – регулярной (D_p). Гранулярность пленки определенного класса зависит от среднего значения оптической плотности и площади измерительной диафрагмы [12].

Для оценки гранулярности пленки необходимы следующие материалы и приборы:

- рентгеновский снимок, который содержит не менее пяти участков с диффузной оптической плотностью в интервале от 1,5 до 2,8 Б, для построения кривой зависимости диффузной оптической плотности от регулярной;
- рентгеновский снимок со средней диффузной оптической плотностью $\bar{D}_d = 2$ Б для измерения не менее 1160 значений регулярной оптической плотности с шагом 100 мкм;
- денситометр;
- микроденситометр.

Рентгеновский снимок с пятью и более значениями диффузной оптической плотности в интервале от 1,5 до 2,8 Б можно получить разными способами, например, получив рентгенограмму при экспонировании ступенчатого объекта с соответствующим подбором режима и параметров; получив сенситограмму, содержащую восемь участков с диффузной оптической плотностью, при экспонировании пленки с помощью сенситометра; получив клин оптических плотностей в результате изменения продолжительности экспонирования радиографической пленки.

Микроденситометр спроектирован и изготовлен в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Оформлен патент на изобретение микроденситометра, который зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ № 2855923 (заявка № 2024140038 от 27.12.2024). Это уникальная оптическая установка, не имеющая аналогов в России и за рубежом. Функциональная схема микроденситометра представлена на рис. 1.

Ориентация оптической системы микроденситометра, содержащей два объектива – в приемном и осветительном каналах, перпендикулярна поверхности исследуемой радиографической пленки. Осветитель содержит объектив с апертурным углом, превышающим апертурный угол объектива приемного канала. При этом объектив приемного канала выполнен с возможностью фокусировки на середину толщины радиографической пленки таким образом, чтобы нерезкость в каждом из двух слоев фотоэмульсии, расположенных по обе стороны от поверхности пленки, не превышала 5 мкм.

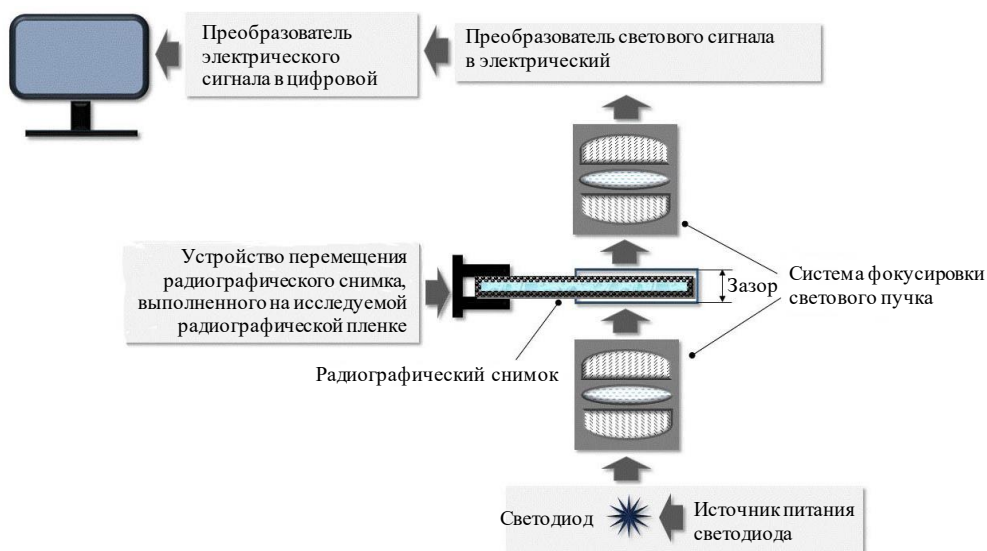


Рис. 1. Функциональная схема микроденситометра

Предметной плоскостью осветителя, соответствующей середине толщины исследуемой радиографической пленки, является середина зазора между осветительным и приемным каналами толщиной 200 мкм, через который протягивается пленка, закрепленная с помощью зажима на каретке. С помощью привода, размещенного в корпусе микроденситометра, пленка линейно сканируется с длиной перемещения 116 мм и шагом 100 мкм [8].

В программном обеспечении микроденситометра реализован алгоритм вычисления регулярной оптической плотности как десятичного логарифма отношения падающего на пленку и прошедшего через нее световых потоков.

По окончании сбора данных в автоматическом режиме будут получены 1160 значений регулярной оптической плотности исследуемой пленки, которые можно скопировать и сохранить в виде отдельного документа в удобном формате (Excel, Microsoft Word) для дальнейшей работы.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Процедура определения гранулярности и обработка результатов

Получение сенситограммы с диапазоном оптической плотности от 1,5 до 2,8 Б

Экспонирование фрагмента исследуемой радиографической пленки с целью получения рентгенограммы с диапазоном оптических плотностей проведено на сенситометре при следующем режиме рентгеновского аппарата: анодное напряжение 40 кВ, ток трубки 10 мА, продолжительность 1,5 мин, фокусное расстояние 700 мм.

При вычислении гранулярности значения регулярной оптической плотности, полученные с помощью микроденситометра, необходимо преобразовывать в диффузную оптическую плотность, используя график зависимости $\lg D_d = f(\lg D_p)$. Для этого при получении пяти и более участков со значениями диффузной оптической плотности в интервале от 1,5 до 2,8 Б на сенситограмме необходимо выполнить по пять измерений диффузной и регулярной оптической плотности на каждом участке, вычислить их логарифмы и построить линейную зависимость $\lg D_d = f(\lg D_p)$.

На рис. 2 показана сенситограмма с выбранным диапазоном оптических плотностей от 1,5 до 2,8 Б на пяти участках, в указанных точках измерены диффузная D_d и регулярная D_p оптическая плотность. Данные измерения представлены в табл. 1.

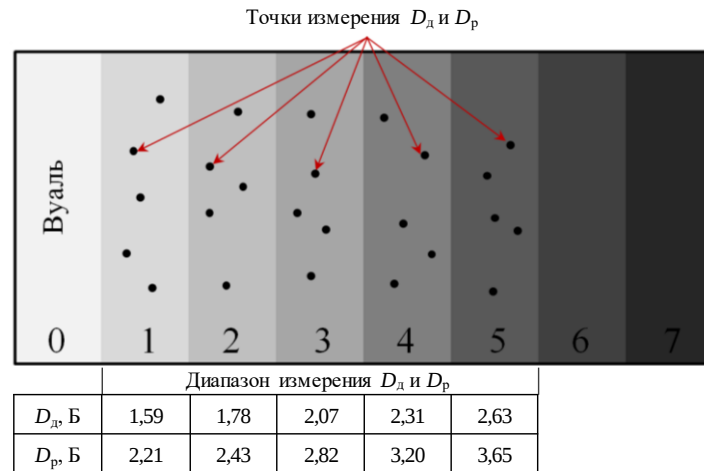


Рис. 2. Рабочая сенситограмма для получения зависимости диффузной D_d и регулярной D_p оптической плотности $\lg D_d = f(\lg D_p)$

Таблица 1

Логарифмы диффузной D_d и регулярной D_p оптической плотности

Показатель	Номер точки измерения на участке сенситограммы	Значения показателей для участка сенситограммы				
		1	2	3	4	5
$\lg D_d$, Б	1	0,20	0,24	0,31	0,37	0,43
	2	0,20	0,26	0,30	0,34	0,40
	3	0,23	0,28	0,32	0,36	0,41
	4	0,18	0,23	0,34	0,38	0,43
	5	0,20	0,24	0,31	0,37	0,43
$\lg D_p$, Б	1	0,35	0,39	0,45	0,50	0,56
	2	0,35	0,39	0,45	0,51	0,56
	3	0,34	0,39	0,46	0,51	0,57
	4	0,34	0,37	0,44	0,51	0,56
	5	0,34	0,39	0,45	0,51	0,56

Примечание. Значения получены при фотометрировании и микрофотометрировании сенситограммы, представленной на рис. 2.

Построение кривой линейной регрессии (рис. 3) и нахождение коэффициентов осуществляют с помощью программы Excel. Далее любые значения диффузной оптической плотности (средние и единичные) представляют собой пересчет из значений регулярной оптической плотности посредством коэффициентов линейной регрессии [13].

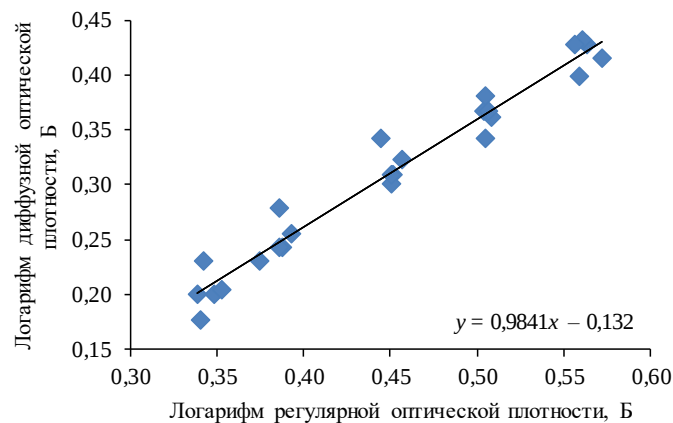


Рис. 3. Кривая линейной регрессии $\lg D_d = f(\lg D_p)$

Получение рентгеновского снимка

Фрагмент исследуемой радиографической пленки помещают перед выходным окном излучателя рентгеновского аппарата и экспонируют (анодное напряжение 40 кВ, ток трубки 10 мА, продолжительность 1 с, фокусное расстояние 700 мм), далее пленку подвергают химико-фотографической обработке и фотометрируют посредством денситометра, получая в результате рентгеновский снимок со средней диффузной оптической плотностью 2 Б.

Посредством перемещающего устройства микроденситометра радиографический снимок автоматически сканируют прямолинейно с шагом 100 мкм на расстоянии 116 мм.

При размещении каждого участка под пучком света автоматически фиксируется его регулярная оптическая плотность, которая в дальнейшем преобразуется в цифровой сигнал, и таким образом осуществляется сбор оцифрованных результатов. На мониторе в программе MS Excel высвечивается таблица с выборкой из 1160 значений регулярной оптической плотности одновременно двух эмульсионных слоев [14]. Анализ выборки оптической плотности показывает ее колебания, связанные не только с гранулярностью. Неравномерная толщина эмульсионного слоя и оси пленки, на которую наносится эмульсионный слой, также вызывает неравномерность оптической плотности (рис. 4).

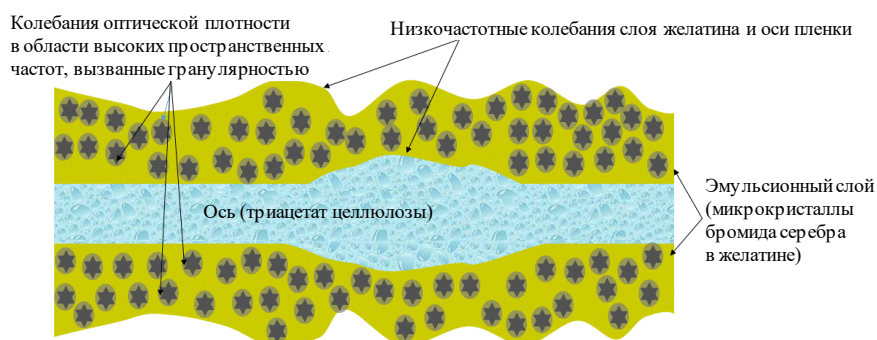


Рис. 4. Строение эмульсионного слоя пленки

Вклад в гранулярность вносят следующие явления:

- квантовые флуктуации излучения;
- статистические колебания количества микрокристаллов на единице площади пленки;
- образование клубков проявленных микрокристаллов по длине свободного пробега фотоэлектронов и комптоновских электронов.

Пространственная частота колебаний, вызванных гранулярностью, составляет несколько микрометров. Колебания оптической плотности, вызванные неравномерностью нанесения эмульсионного слоя, колебаниями толщины оси, распространяются на длину от 0,1 до 10,0 мм, т. е. пространственная частота становится на несколько порядков меньше. Для того чтобы отфильтровать колебания оптической плотности с низкой пространственной частотой, выборку из 1160 значений оптической плотности подвергают фильтрации [15, 16].

Высокочастотный фильтр представляет собой прямоугольное окно шириной 6 мм. Массив значений регулярной оптической плотности из 1160 значений $\{D_d = 1160 \text{ зн.}\}$, пересчитанных в диффузную оптическую плотность, фильтруют, перемещая высокочастотный фильтр на шаг, равный 100 мкм (рис. 5). При этом математически выполняется функция свертки:

$$\Delta D_{Di} = D_{Di} - \frac{1}{61} \sum_{i=-30}^{i+30} D_{Di \pm 30},$$

где D_{Di} – оптическая плотность произвольной i -й точки на линии сканирования общей длиной 116 мм, Б.

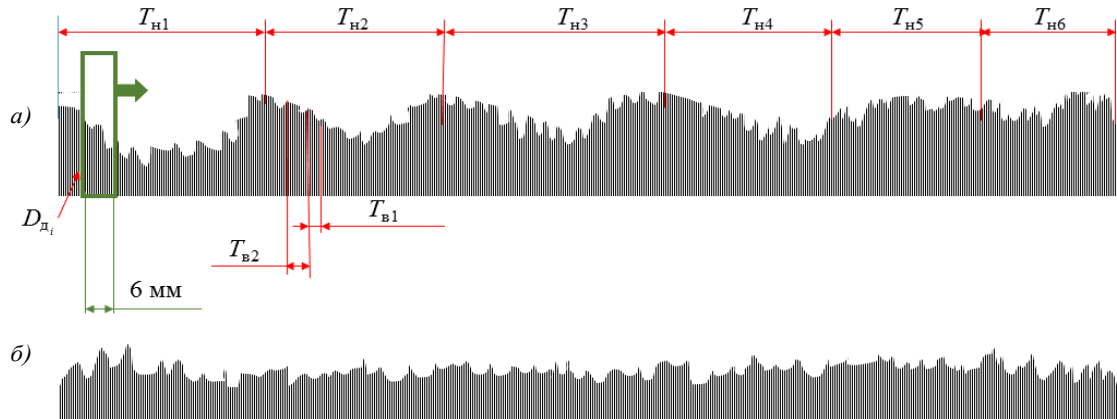


Рис. 5. Схема низких пространственных частот до (а) и после (б) фильтрации: T_n – периоды низкочастотных колебаний оптической плотности, вызванных изменениями толщины эмульсионного слоя и оси пленки; T_b – периоды высокочастотных колебаний оптической плотности, вызванных гранулярностью; D_{Di} – оптическая плотность произвольной i -й точки на линии сканирования

Во избежание повторения работы фильтра первые и последние 30 измерений D_{Di} необходимо исключить из измеренного массива $\{D_d = 1160 \text{ зн.}\}$. В результате фильтрации будет получен «сглаженный», т. е. лишенный низкочастотных колебаний массив $\{D_d = 1100 \text{ зн.}\}$, который будет состоять из 1100 значений на длине участка 110 мм [17], а отфильтрованное значение диффузной оптической плотности i -й точки D_{fi} массива $\{D_d = 1100 \text{ зн.}\}$ определяют вычитанием из значения D_{Di} массива $\{D_d = 1160 \text{ зн.}\}$ величины ΔD_{Di} , сглаженной в результате фильтрации:

$$D_{fi} = D_{Di} - \Delta D_{Di}.$$

После проведения фильтрации участок длиной 110 мм разделяют на отрезки длиной 1,9 мм каждый с 20 значениями оптической плотности и с расстоянием между отрезками 0,1 мм. Для проведения расчетов гранулярности отрезков должно быть не менее 55 и в каждом отрезке следует определить среднее значение оптической плотности (табл. 2). Среднее значение отфильтрованной диффузной оптической плотности n -го отрезка $\bar{D}_{fn}$ рассчитывается по формуле

$$\bar{D}_{fn} = \frac{1}{20} [D_{f(n,1)} + D_{f(n,2)} + \dots + D_{f(n,i)} + \dots + D_{f(n,20)}],$$

где $D_{f(n,i)}$ – значение отфильтрованной диффузной оптической плотности в i -й точке, Б.

Рассчитывают гранулярность на каждом из 55 отрезков (табл. 3). Гранулярность n -го отрезка определяется из соотношения

$$\sigma_{Dn} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (D_{f(n,i)} - \bar{D}_{fn})^2}{20 - 1}}.$$

Таблица 2

Отфильтрованная диффузная оптическая плотность на 55 отрезках

Номер отрезка	Отфильтрованная диффузная оптическая плотность, Б						средняя
	в точках						
	1	2	...	i	...	20	
1	$D_{f(1,1)}$	$D_{f(1,2)}$	...	$D_{f(1,i)}$	...	$D_{f(1,20)}$	$\overline{D}_{f_1}$
2	$D_{f(2,1)}$	$D_{f(2,2)}$	...	$D_{f(2,i)}$	...	$D_{f(2,20)}$	$\overline{D}_{f_2}$
...	...	...	...	...	...	...	...
n	$D_{f(n,1)}$	$D_{f(n,2)}$	...	$D_{f(n,i)}$	...	$D_{f(n,20)}$	$\overline{D}_{f_n}$
...	...	...	...	...	...	...	...
55	$D_{f(55,1)}$	$D_{f(55,2)}$	...	$D_{f(55,i)}$	...	$D_{f(55,20)}$	$\overline{D}_{f_{55}}$

Таблица 3

Гранулярность на 55 отрезках

Номер отрезка	1	2	...	n	...	55
Гранулярность на отрезке	σ_{D_1}	σ_{D_2}	...	σ_{D_n}	...	$\sigma_{D_{55}}$

Полученные значения гранулярности отсортировывают по возрастанию, при этом центральное значение гранулярности является медианой, в случае 55 отрезков медианой является 28-й отсортированный отрезок (табл. 4).

Таблица 4

Гранулярность на 55 отсортированных отрезках

Номер отсортированного отрезка	1'	2'	...	28'	...	55'
Гранулярность на отрезке	$\sigma_{D_{\min}}$	$\sigma_{D_{2'}}$	...	$\sigma_{D_{\text{med}}}$	...	$\sigma_{D_{\max}}$

Для распределения критерия χ -квадрат характерно следующее. Если k – количество последовательных наблюдений в пределах группы C , а критическим значением распределения критерия χ -квадрат является $\alpha = 0,5$, то при количестве степеней свободы $k - 1$ для оценки σ_D его медианное значение $\sigma_{D_{\text{med}}}$ умножают на $\sqrt{(k-1)/C}$, где $C = \sigma_{D_{\text{med}}}$ [18]. Если при разделении участка на отрезки значений оптической плотности на отрезке было 20, то медианное значение $\sigma_{D_{\text{med}}}$ необходимо умножить на 1,0179 для статистической поправки.

Увеличение количества отрезков и значений случайной величины обеспечивает более точный результат. Важно не изменить длину группы, равную 1,9 мм (плюс расстояние между группами 0,1 мм), и статистическую поправку, если используется значение поправки, равное 1,0179.

Статистический коэффициент коррекции по требованиям ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023 равен величине $\sqrt{2/\overline{D}_{D=2}}$. Цель такой коррекции состоит в приведении значения σ_D к значению диффузной оптической плотности $\overline{D}_{D=2} = 2,00 \pm 0,05$ Б и получению скорректированного значения $\sigma_{\overline{D}=2}$.

Для оценки среднего значения гранулярности необходимо выполнить не менее шести измерений гранулярности на различных образцах исследуемой пленки [19]. При

этом полученные результаты среднего значения гранулярности при отклонении от паспортных значений должны быть не более $\pm 10\%$ на 95%-ном доверительном интервале.

Практическое определение гранулярности посредством разработанного микроденситометра

На рис. 6 представлена фотография микроденситометра, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

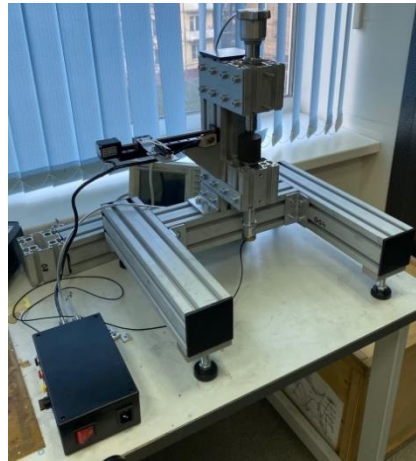


Рис. 6. Разработанный микроденситометр

Для проверки работы микроденситометра выбран образец радиографической пленки типа D5 Agfa с известным показателем гранулярности.

Для получения массива регулярной оптической плотности 1160 значений с шагом 100 мкм использовали рентгеновский снимок со средней диффузной оптической плотностью, равной 2 Б.

Для построения кривой линейной регрессии использовали сенситограмму с диапазоном оптической плотности 0,24–2,38 Б. По полученным массивам диффузной и регулярной оптической плотности построили график зависимости $\lg D_d = f(\lg D_p)$ и определили коэффициенты линейной регрессии.

Измеренные микроденситометром значения регулярной оптической плотности преобразовали в диффузную оптическую плотность на основе вычисленных коэффициентов линейной регрессии.

Для получения отфильтрованного массива, состоящего из 1100 значений, на длине участка 110 мм провели фильтрацию.

Далее участок длиной 110 мм разделили на отрезки длиной 1,9 мм и провели расчет гранулярности 55 отрезков, определили медианное значение гранулярности $\sigma_{D_{med}}$. Для поправки $\sigma_{D_{med}}$ умножили на 1,0179 и полученное значение гранулярности σ_D скорректировали путем приведения к значению диффузной оптической плотности $\bar{D}_{D=2} = 2,00 \pm 0,05$ Б, получив скорректированное значение гранулярности $\sigma_{\bar{D}=2}$.

Выполнили шесть измерений $\sigma_{\bar{D}=2}$ на различных образцах исследуемой пленки и вычислили среднее значение гранулярности $\bar{\sigma}_{\bar{D}=2}$.

Полученное среднее значение гранулярности сравнили с паспортными данными. Согласно паспортным данным, максимальная гранулярность пленки типа D5 Agfa $\sigma_{D_{max}} = 0,028$ при оптической плотности $D = 2$ Б над плотностью вуали $D_0 = 0,25$ Б. В результате измерений выявлено, что полученное значение отличается от паспортного не более чем на 1,7 %.

Заключения

Разработана и экспериментально проверена последовательность оценки гранулярности радиографических технических пленок. Сконструирован и создан микроденситометр, позволяющий получить необходимый материал для определения структурометрических показателей радиографических технических пленок. В ходе экспериментальной проверки работоспособности разработанных средств и последовательности исследования получен положительный результат. Перспектива дальнейших исследований состоит в аттестации разработанных систем в качестве средств измерения.

Список источников

1. ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023. Контроль неразрушающий. Радиографические пленки для промышленной радиографии. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 12 с.
2. ГОСТ Р ИСО 11699-2–2022. Контроль неразрушающий. Радиографические пленки для промышленной радиографии. Часть 2. Контроль обработки пленок с помощью опорных значений. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 10 с.
3. Каблов Е.Н. Роль государственных научных центров РФ в обеспечении национальной безопасности страны // Перспективные технологии для систем безопасности. 2023. № 1. С. 4–9.
4. Гнедин М.М., Шаблов С.В. Радиографический контроль: требования нормативной документации по выбору радиографической пленки // В мире неразрушающего контроля. 2019. № 1. С. 14–16.
5. Коваленко Т.С. Дефект типа «пригар» на литых заготовках из жаропрочных никелевых сплавов (типа ЖС32) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). С. 14–22. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
6. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Панаев В.Г., Кудасов С.В., Широкожуков А.В. Магниево-алюминиевые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). С. 25–34. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
7. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Елишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 30–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.01.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
8. Михайлова Н.А., Демидов А.А., Чертищев В.Ю., Осияненко Н.В. Определение гранулярности радиографических пленок в соответствии с ISO 11699-1 // Дефектоскопия. 2021. № 2. С. 44–50. DOI: 10.31857/S0130308221020056.
9. Добромислов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1999. 104 с.
10. Осияненко Н.В., Косарина Е.И., Демидов А.А., Гримова А.П. Определение характеристик радиографических пленок // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). С. 119–129. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-119-129.
11. Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Суворов П.В., Демидов А.А. Природа шумов в цифровой радиографии, их моделирование и способы подавления в цифровом радиографическом изображении (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). С. 142–152. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-142-152.
12. Штань А.С., Румянцев С.В., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам контроля. М.: Атомиздат, 1983. 210 с.
13. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс, 2007. 912 с.

14. Шашлов А.Б. Основы светотехники: учебник. М.: Логос, 2016. 256 с.
15. Мельникова И.Н., Фастовец Н.О. Теория вероятностей: конспект лекций для факультета АиВТ. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2017. 100 с.
16. Калман Р., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 354 с.
17. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа: учеб. пособие. 2-е изд. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 488 с.
18. Дмитриев К.В. Теория и практика обработки сигналов и полей // Открытые видеолекции учебных курсов МГУ им. М.В. Ломоносова. 155 с. URL: <https://teach-in.ru/file/synohsis/pdf/theory-and-practice-of-signal-and-field-processing-M.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
19. Прохоров А.В., Савицкий А.В. Характеризующие статистики и их применение // Теория вероятности и ее применение. 2021. Т. 66. № 3. С. 487–507.

References

1. State Standard R ISO 11699-1–2023. *Non-destructive testing. Radiographic films for industrial radiography. Part 1. Classification of film systems for industrial radiography*. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2023, 12 p.
2. State Standard R ISO 11699-2–2022. *Non-destructive testing. Radiographic films for industrial radiography. Part 2. Inspection of film processing using reference values*. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022, 10 p.
3. Kablov E.N. The role of state research centers of the Russian Federation in ensuring national security. *Perspektivnye tekhnologii dlya sistem bezopasnosti*, 2023, no. 1, pp. 4–9.
4. Gnedin M.M., Shablov S.V. Radiographic testing: requirements of regulatory documentation for the selection of radiographic film. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2019, no. 1, pp. 14–16.
5. Kovalenko T.S. «Burned» type defect on cast billets of heat-resistant nickel alloys (type ZhS32). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 14–22. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
6. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokzhukov A.V. Magnesium alloys in the design of navigation system products. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 25–34. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 12, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
7. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 30–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
8. Mikhailova N.A., Demidov A.A., Chertishchev V.Yu., Osyanenko N.V. Determination of granularity of radiographic films in accordance with ISO 11699-1. *Defektoskopiya*, 2021, no. 2, pp. 44–50. DOI: 10.31857/S0130308221020056.
9. Dobromyslov V.A. *Radiation methods of non-destructive testing*. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 104 p.
10. Osyanenko N.V., Kosarina E.I., Demidov A.A., Grimova A.P. Determination of characteristics of radiographic films. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), pp. 119–129. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-119-129.
11. Kosarina E.I., Mikhaylova N.A., Suvorov P.V., Demidov A.A. The nature of noise in digital radiography, their modeling and ways of suppression in the digital radiographic image (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), pp. 142–152. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-142-152.
12. Shtan A.S., Rumyantsev S.V., Goltsev V.A. *Handbook of Radiation Monitoring Methods*. Moscow: Atomizdat, 1983, 210 p.
13. Draper N., Smith G. *Applied Regression Analysis*. Moscow: Vilyams, 2007, 912 p.
14. Shashlov A.B. *Fundamentals of Lighting Engineering*: Textbook. Moscow: Logos, 2016, 256 p.

15. Melnikova I.N., Fastovets N.O. *Probability Theory: Lecture Notes for the Faculty of Automation and Computer Engineering*. Moscow: Publ. Center of the Gubkin Rus. State Univ. of Oil and Gas (National Research University), 2017, 100 p.
16. Kalman R., Farb P., Arbib M. *Essays on the Mathematical Theory of Systems*. Moscow: LIBROKOM, 2012, 354 p.
17. Moiseev N.N. *Mathematical Problems of Systems Analysis: A Textbook*. 2nd ed. Moscow: LIBROKOM, 2012, 488 p.
18. Dmitriev K.V. Theory and Practice of Signal and Field Processing. *Open Video Lectures of the Study Courses of Lomonosov Moscow State University*. 155 p. Available at: <https://teach-in.ru/file/synohsis/pdf/theory-and-practice-of-signal-and-field-processing-M.pdf> (accessed: January 12, 2026).
19. Prokhorov A.V., Savitsky A.V. Characterizing statistics and their application. *Teoriya veroyatnosti i ee primeneniye*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 487–507.

Информация об авторах

Осияненко Наталья Викторовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Далин Михаил Альбертович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Косарина Екатерина Ивановна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Демидов Александр Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nataliya V. Osiyanenko, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail A. Dalin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ekaterina I. Kosarina, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr A. Demidov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.03.2026.

The article was submitted 02.03.2026; approved and accepted for publication after reviewing 12.03.2026.