

УДК 620.192.63

*А.А. Демидов<sup>1</sup>, Е.И. Косарина<sup>1</sup>, Н.В. Коурова<sup>1</sup>, Н.А. Михайлова<sup>1</sup>***СЕНСИТОМЕТР ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ КРИВЫХ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНОК И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ИЗЛУЧЕНИЮ И ГРАДИЕНТА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ISO 11699-1:2008**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-81-90

*Анализ методики ВИАМ по испытанию радиографических пленок и ее сравнение с регламентом ISO 11699-1:2008 показали объективность последнего. Приведено описание сенситометрической установки, представлен расчет длины совмещенных окон диска сенситометра, непосредственно по снятым показаниям получена зависимость оптической плотности от логарифма дозы излучения. Представленные сенситометрические характеристики, полученные в результате испытания радиографических пленок D4, D5, D7 фирмы Agfa (Бельгия), соответственно адекватны заявленным фирмой классам пленочных систем по ISO 11699-1:2008. Построены характеристические кривые испытанных пленок, по которым определены вуаль, градиенты при оптической плотности 2 и 4 Б, чувствительность пленок к излучению при оптической плотности 2 Б.*

**Ключевые слова:** радиографическая пленка, сенситометр, градиент, оптическая плотность, чувствительность к излучению, вуаль, характеристическая кривая, класс пленочной системы.

*A.A. Demidov<sup>1</sup>, E.I. Kosarina<sup>1</sup>, N.V. Kourova<sup>1</sup>, N.A. Mikhailova<sup>1</sup>***SENSITOMETER FOR BUILDING CHARACTERISTIC CURVES OF X-RAY FILMS AND DETERMINING THE SENSITIVITY TO RADIATION AND GRADIENT IN ACCORDANCE WITH ISO 11699-1:2008 REQUIREMENTS**

*A comparison of the VIAM method for testing x-ray films and ISO 11699-1:2008 showed the objectivity of the latter. The description of the sensitometric facility is given in this article. The calculation of the length of the combined Windows of the sensitometer disk is presented, which allows to obtain the dependence of the optical density on the logarithm of the radiation dose directly from the taken readings. The presented sensitometric characteristics obtained as a result of testing of radiographic films Agfa D4, Agfa D5, Agfa D7 are correspondingly adequate to the classes of film systems declared by the Agfa (Belgium) according to ISO 11699-1:2008. The characteristic curves of the tested films are created, which determine the fog, gradients at an optical density of 2 and 4 B, and the sensitivity of the films to radiation at an optical density of 2 B.*

**Keywords:** x-ray film, sensitometer, gradient, optical density, sensitivity to radiation, fog, characteristic curve, class of the film system.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии планируется в ближайшие годы введение межгосударственных стандартов по радиационному неразрушающему контролю ISO 17636-1:2017, ISO 11699-1:2008, ISO 11699-2:2018 и других в качестве национальных стандартов Российской Федерации.

Стандарты ISO 11699-1:2008 и ISO 11699-2:2018 посвящены классификации пленочных систем, правилам ее применения и обработки и оценке качества [1, 2].

На предприятиях авиационной отрасли широко распространен рентгеновский неразрушающий контроль с регистрацией результатов на радиографическую пленку.

Несмотря на невысокую производительность, трудоемкость и высокую себестоимость, рентгенографический контроль обладает преимуществом – получаемое изображение отличается высоким качеством, что приводит к надежному обнаружению дефектов и дает гарантию безопасной эксплуатации летательных аппаратов [3–5]. Однако все эти условия выполнимы при соблюдении требований нормативных документов по радиационным методам неразрушающего контроля.

В настоящее время при проведении рентгеновского неразрушающего контроля в процессе разработки и создания авиационной техники сложилась ситуация, когда применяются радиографические пленки как отечественного, так и зарубежного производства. При этом технология собственно контроля осуществляется по требованиям нормативных документов, не регламентирующих применение пленочных систем [6].

Системой международных стандартов ISO при радиографическом контроле выбор класса пленочной системы строго обозначен в зависимости от материала, толщины, энергии излучения и требуемого класса контроля [7, 8]. Принадлежность пленочной системы к тому или иному классу устанавливает Берлинский институт аттестации материалов (БАМ). В связи с предстоящим введением новой системы стандартов ВИАМ в инициативном порядке поставил перед собой задачу – разработать и создать средства и нормативную документацию по испытанию радиографических пленок, обеспечивающих абсолютную объективную оценку параметров радиографических пленок (градиента, гранулярности, чувствительности к излучению), не противоречащую ISO 11699-1:2008 [9].

### Выбор объема разработок и испытаний

Класс пленочной системы по ISO 11699-1:2008 – комбинация радиографической пленки и ее фотообработки, осуществляемой в соответствии с инструкциями фирм-изготовителей радиографических пленок и фирм-изготовителей химикатов для их фотообработки [1, 2, 10]. Пленочная система, относящаяся к одному из шести классов, должна соответствовать значениям характеристик, представленным в табл. 1.

Таблица 1

#### Классификация пленочных систем

Класс пленочной системы	Минимальный градиент $g$		Максимальная гранулярность $\sigma_{S_{max}}$ при $S$ , равной 2 Б, с учетом $S_0$	Минимальное отношение градиент/шум $g/\sigma_S$
	при $S^*$ , равной 2,0, с учетом $S_0^{**}$	при $S$ , равной 4,0 Б, с учетом $S_0$		
C1	4,5	7,5	0,018	300
C2	4,3	7,4	0,020	230
C3	4,1	6,8	0,023	180
C4	4,1	6,8	0,028	150
C5	3,8	6,4	0,032	120
C6	3,5	5,0	0,039	100

\*  $S$  – оптическая плотность экспонированной пленки.  
 \*\*  $S_0$  – вуаль радиографической пленки.

Для того чтобы оценить принадлежность радиографических пленок к определенному классу, в ВИАМ была разработана методика их испытаний, при применении которой для определения количественных значений параметров испытываемых пленок косвенным путем использован метод сравнения с параметрами радиографической

пленки, имеющей принадлежность к определенному классу по ISO 11699-1:2008 [9]. Например, испытания радиографической пленки РТ-5Д (ООО «НПП Тасма») проводили одновременно с радиографической пленкой D5 (Agfa), относящейся к классу С4. Согласно методике, разработанной в ВИАМ, при испытании определяли зависимость оптической плотности от экспозиционной дозы излучения. Причем, для того чтобы получить разные значения экспозиционной дозы излучения, использовали тот факт, что излучение ослабляется в зависимости от толщины слоя поглотителя (рис. 1):

$$D_{Э1} = D_{Э0} \cdot e^{-\mu h_1}; \quad D_{Э2} = D_{Э0} \cdot e^{-\mu h_2}; \quad \dots; \quad D_{Э7} = D_{Э0} \cdot e^{-\mu h_7},$$

где  $D_{Э0}$  – экспозиционная доза излучения в отсутствие поглотителя, Р;  $D_{Э1}–D_{Э7}$  – экспозиционная доза излучения за поглотителем толщиной  $h_1–h_7$  соответственно;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления материалом клина,  $\text{см}^{-1}$ .

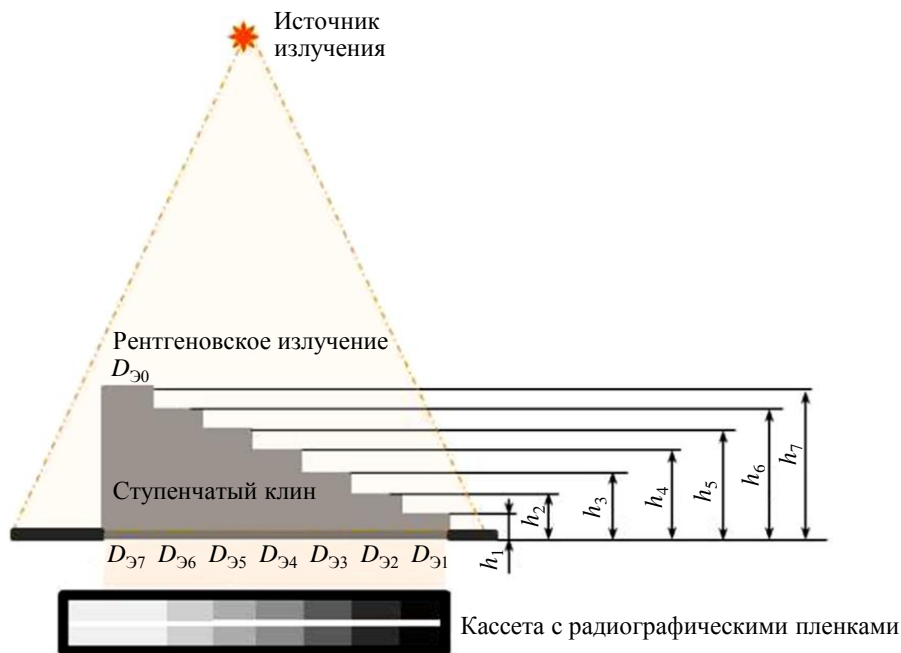


Рис. 1. Схема испытания радиографических пленок по методике ВИАМ

Энергетический спектр выходящего из окна рентгеновской трубки излучения достаточно широк, т. е. в своем составе содержит фотоны разной энергии. Ослабление излучения поглотителем происходит неравномерно – прежде поглощаются фотоны с низкой энергией. И чем толще слой поглотителя, тем больше вероятность поглощения фотонов с относительно низкой энергией. Спектральный состав излучения, прошедшего ступени клина разной толщины, различен, поэтому его воздействие на эмульсионный слой пленки разное и зависит не только от величины дозы, но и от ее спектрального состава.

Согласно описанию ISO 11699-1:2008, для построения характеристической кривой (ХК) радиографической пленки – зависимости оптической плотности от логарифма экспозиции при постоянном анодном напряжении, необходим набор доз излучения различных значений, причем этот набор должен отличаться только величиной, но не спектральным составом. С этой целью разработана и изготовлена установка, посредством которой обеспечивались разная продолжительность экспонирования отдельных участков пленки и одинаковая мощность дозы излучения. При разработке эскизов установки использовали расчеты, приведенные в [11].

### Практическое определение параметров радиографических пленок

Большую часть свойств радиографической пленки определяют по ее характеристической кривой, которую необходимо построить с учетом требований ISO 11699-1:2008. В результате была создана установка для ее получения.

#### Установка для получения характеристической кривой радиографической пленки

По требованиям ISO 11699-1:2008 образцы пленок следует экспонировать рентгеновским излучением, генерируемым рентгеновской трубкой с вольфрамовой мишенью анода. Собственный фильтр трубки, наряду с дополнительным медным фильтром, расположенным, по возможности, максимально близко к мишени, должен обеспечить фильтрацию, равноценную медному фильтру толщиной  $8,00 \pm 0,05$  мм. Напряжение на рентгеновской трубке необходимо отрегулировать так, чтобы получить значение половинного ослабления с медным фильтром толщиной  $3,5 \pm 0,2$  мм. Этому требованию обычно удовлетворяет напряжение, равное  $\sim 220$  кВ [12].

Пленочная система должна включать передний и задний свинцовые экраны толщиной от 0,02 до 0,04 мм. Если используются пленки с односторонним эмульсионным слоем, то покрытая эмульсией поверхность должна располагаться лицевой стороной к рентгеновской трубке. Необходимо обеспечить хороший контакт пленки с экраном. Работу сенситометра иллюстрирует рис. 2.

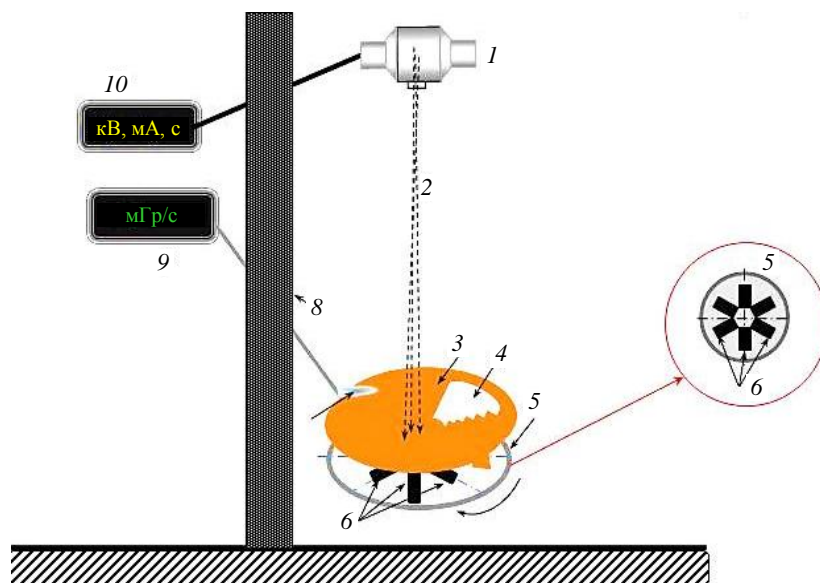


Рис. 2. Схема получения сенситограмм при испытании радиографических пленок:

1 – источник рентгеновского излучения; 2 – рентгеновское излучение; 3 – неподвижный экран с совмещенными окнами 4; 5 – вращающийся диск с закрепленными на нем кассетами с радиографической пленкой 6; 7 – ионизационная камера; 8 – защитный экран; 9 – дозиметр; 10 – пульт рентгеновского аппарата

Вращающийся диск 5 имеет специальные зажимы, с помощью которых закреплены кассеты с образцами радиографических пленок 6. Диск вращается со скоростью 100 об/мин. Над диском 5 расположен неподвижный диск 3, имеющий специальные совмещенные окна 4, и на нем укреплена ионизационная камера 7 дозиметра 9, регистрирующая мощность дозы излучения  $P$  (мГр/с). Если включить рентгеновский

аппарат на определенный режим с продолжительностью экспозиции  $t_{\text{экс}}$ , то за это время доза излучения составит  $D=P \cdot t_{\text{экс}}$ .

Участки радиографических пленок при вращении расположены под разными по площади совмещенными окнами и, следовательно, будут находиться под пучком излучения разное время.

После фотообработки экспонированной радиографической пленки получим сенситограмму: распределение оптической плотности в зависимости от дозы излучения. Для удобного и быстрого построения характеристической кривой радиографической пленки размеры совмещенных окон выбирают соответствующим образом (рис. 3).

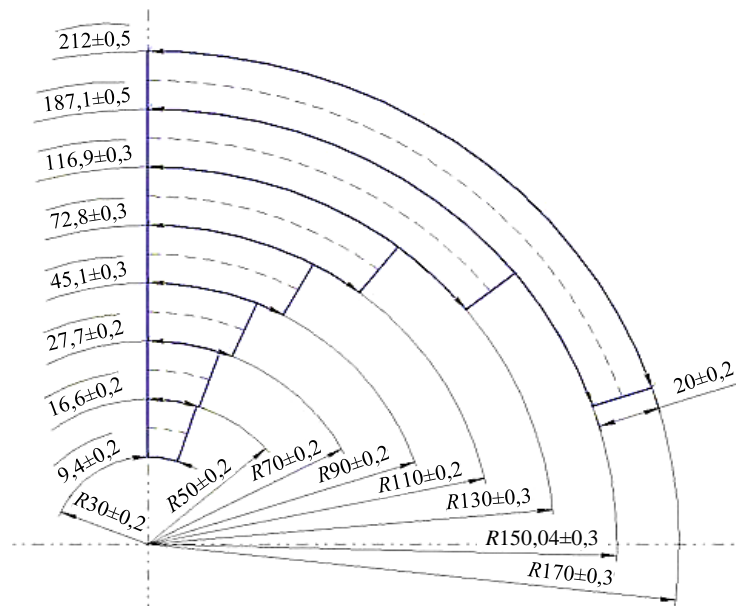


Рис. 3. Чертеж совмещенных окон сенсиโตметра

Если диск вращается со скоростью 100 об/мин, его угловая скорость  $\omega$  постоянна и составляет

$$\omega = 200\pi/60 = 10,47 \text{ с}^{-1},$$

а линейная скорость  $V$  на  $n$ -й дуге, соответственно:

$$V_n = \omega \cdot R_n = 10,47 \cdot R_n \text{ мм/с},$$

где  $R_n$  – радиус  $n$ -й дуги окна;  $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$  – номер окна.

Продолжительность экспонирования каждого участка длиной  $L_n$  составляет

$$t_{n\text{экс}} = L_n / V_n,$$

т. е. длина дуги пропорциональна дозе излучения, а логарифм длины дуги пропорционален логарифму дозы излучения:

$$\lg D = \lg(P \cdot t_{\text{экс}}) = \lg t_{\text{экс}} + \lg P = \lg t_{\text{экс}} + \text{const.}$$

При заданном режиме экспонирования  $P = \text{const}$ , следовательно,  $\lg P = \text{const}$ . При этом

$$t_{n\text{экс}} = \frac{L_n}{V_n} = \frac{L_n}{R_n \cdot \omega},$$

где  $t_{n\text{экс}}$  – продолжительность экспонирования  $n$ -го поля.

Тогда

$$\lg t_{\text{нэкс}} = \lg \frac{L_n}{R_n \cdot \omega} = \lg \frac{L_n}{R_n} - \lg \omega = \lg \frac{L_n}{R_n} - 1,02,$$

где  $\omega=10,47$ ;  $\lg \omega=1,02$ .

Следовательно:

$$\lg D = \lg \frac{L_n}{R_n} - \text{const.}$$

С точностью до константы логарифм дозы пропорционален логарифму величины  $\frac{L_n}{R_n}$ .

Задавая величины логарифмов длины дуг  $L_n$  (табл. 2), рассчитали радиусы дуг  $R_n$ .

Таблица 2

Размеры совмещенных окон сенситометра

$\lg L_n$	2,30	2,10	1,90	1,70	1,50	1,30	1,10	0,90
$L_n$ , мм	200	126	79	50	32	20	13	8
$R_n$ , мм	160	140	120	100	80	60	40	20
$L_n/R_n$	1,25	0,90	0,66	0,50	0,40	0,33	0,32	0,40
$\lg L_n/R_n$	0,01	-0,046	-0,18	-0,30	-0,40	-0,48	-0,49	-0,40

Таким образом, при вращении диска с испытываемыми пленками оптическая плотность участков, находящихся под соответствующими окнами, пропорциональна логарифму дозы излучения. На рис. 4 представлены фотография диска сенситометра с совмещенными окнами и фотография системы получения сенситограмм. В качестве источника рентгеновского излучения использовали рентгеновский аппарат Экстра-вольт 225/С1030, выходное окно которого изготовлено из бериллия.

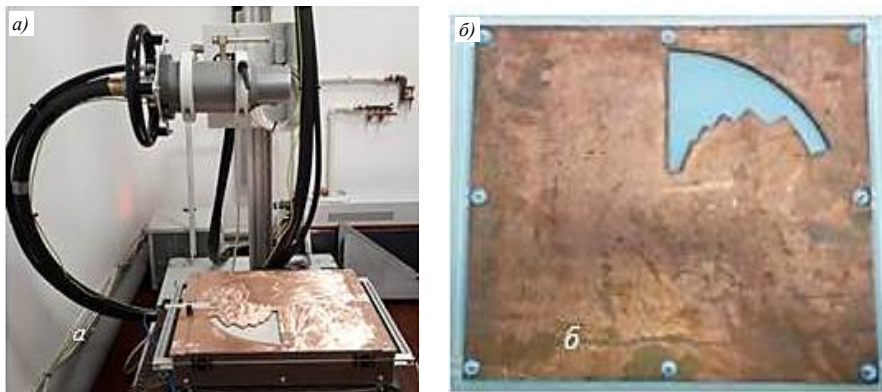


Рис. 4. Схема экспонирования радиографических пленок для получения сенситограмм (а); фотография диска сенситометра с совмещенными окнами (б)

*Фотометрирование сенситограмм, построение характеристической кривой радиографической пленки, определение ее параметров и классификации по ISO 11699-1:2008*

Согласно ISO 11699-1:2008, принадлежность к тому или иному классу определяют для пленочной системы, т. е. для комбинации радиографической пленки и ее фотообработки, осуществляемой в соответствии с инструкциями фирм-изготовителей радиографических пленок и фирм-изготовителей химикатов для их фотообработки. Фотообработку экспонированных образцов радиографических пленок проводили в автомате с использованием проявителя Agfa G128 и фиксажа Agfa G328.

Эти условия должны быть соблюдены при получении сенситограмм из экспонированных образцов испытываемых пленочных систем. Для каждого типа испытываемых радиографических пленок получили по три сенситограммы с общим диапазоном оптической плотности от 0,24 (вуаль) до 5,10 Б.

Полученные сенситограммы (рис. 5) фотометрировали в 12 точках на каждом поле, преимущественно по средней линии каждого поля. Используемый при фотометрировании денситометр регулярно подвергали калибровке (через каждые три измерения проводили установку на «0»). Точность измерения интегральной оптической плотности денситометром составила 0,01 Б в диапазоне оптической плотности 0–5,00 Б.



Рис. 5. Сенситограммы испытываемой радиографической пленки (а); топография измерения оптической плотности полей сенситограммы (б)

Оптическую плотность поля определяют как среднее арифметическое значение результатов 12 измерений для каждого из 8 полей сенситограммы:

$$S'_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} S_i,$$

где  $k$  – номер поля сенситограммы с постоянной оптической плотностью  $k=(1-7)$ ;  $S_i$  – значение оптической плотности при  $i$ -м измерении;  $n$  – число измерений оптической плотности на каждом поле.

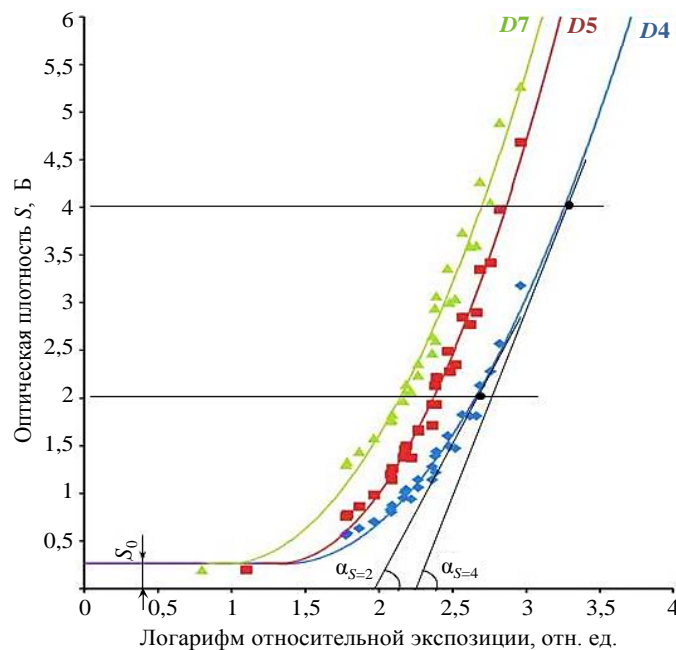


Рис. 6. Характеристические кривые радиографических пленок D4, D5, D7, построенные в результате фотометрирования сенситограмм и аппроксимации полиномом третьего порядка

Массив данных оптической плотности, полученный при фотометрировании сенситограмм, аппроксимировали полиномом третьего порядка. В результате аппроксимации построили зависимости оптической плотности от логарифма дозы излучения, т. е. характеристические кривые радиографических пленок D4, D5, D7 соответственно (рис. 6).

*Определение сенситометрических показателей радиографических пленок по характеристической кривой*

Оптическая плотность вуали  $S_0$  соответствует среднему значению оптической плотности неэкспонированного участка сенситограммы:

$$S'_0 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} S_{0i}$$

Градиентом  $g$  называют тангенс угла наклона характеристической кривой при заданной оптической плотности  $S$ . Аналитически эта зависимость имеет вид

$$g = \frac{dS}{d \lg D} = \frac{D}{\lg e} \cdot \frac{dS}{dD} = 2,30 \cdot D \cdot \frac{dS}{dD} = 2,30 \cdot P \cdot \frac{L_n}{V} \cdot k \cdot \frac{dS}{dD},$$

где  $D$  – доза излучения, требуемая для оптической плотности  $S-S_0$ , Гр;  $e$  – неперово число, равное 2,718;  $\lg e=0,434$ ;  $1/\lg e=2,30$ ;  $S_0$  – оптическая плотность вуали и основы;  $k$  – число оборотов за продолжительность экспонирования.

Для каждого типа пленок выполнили по шесть измерений. Измерения проводили на разных фрагментах пленок, полученные данные усредняли. В результате проведенных испытаний и расчетов получили значения градиентов радиографических пленок D4, D5, D7, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Градиенты радиографических пленок D4, D5, D7**

Тип радиографической пленки / Класс пленочной системы	Значения градиентов радиографических пленок при оптической плотности					
	$S-S_0=2$ Б			$S-S_0=4$ Б		
	по результатам испытаний	заявленные фирмой-изготовителем	по ISO 11699-1:2018	по результатам испытаний	заявленные фирмой-изготовителем	по ISO 11699-1:2018
D4/C3	4,20	4,60	4,10	9,78	8,00	6,80
D5/C4	4,18	4,40	4,10	8,21	7,60	6,80
D7/C5	3,82	4,40	3,80	8,10	7,60	6,40

Из анализа данных видно, что, несмотря на расхождение численных значений градиентов, полученных в результате испытаний и заявленных фирмой Agfa, они безошибочно попадают в классификацию по ISO 11699-1:2008 [13, 14].

*Определение чувствительности пленки к излучению  $K_S$*

Чувствительность радиографической пленки – величина, обратная дозе излучения, которая при воздействии на эмульсионный слой пленки создает оптическую плотность, равную 2 Б. В международной системе стандартов ISO эту характеристику обозначают словом *speed* (англ. «скорость»). По мнению авторов, такой перевод не совсем адекватный, поэтому эту характеристику пленки традиционно называют «чувствительность к излучению» и определяют по характеристической кривой радиографической пленки, построенной в осях «логарифм дозы излучения–оптическая плотность» [ $S(\lg D)$ ] (рис. 7). При оптической плотности  $S=2$  Б находят значение логарифма дозы излучения

в точке  $C$  и определяют значение дозы излучения, которое соответствует  $D=10^{\lg D}$ . Чувствительность радиографической пленки к излучению получают из соотношения

$$K_s = \frac{1}{D} = \frac{1}{10^{\lg D}}.$$

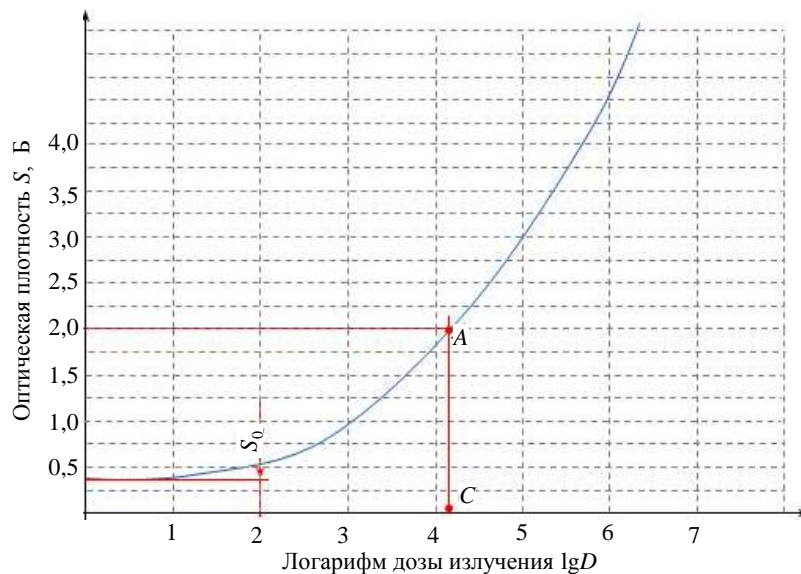


Рис. 7. Определение чувствительности радиографической пленки по характеристической кривой

Результаты определения чувствительности пленок к излучению представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Чувствительность радиографических пленок D4, D5, D7 к излучению**

Тип радиографической пленки/ Класс пленочной системы	Значения чувствительности радиографических пленок к излучению	
	по результатам испытаний	заявленные фирмой-изготовителем
D4/C3	160	100
D5/C4	239	160
D7/C5	476	320

Расхождение значений характеристик радиографических пленок, полученных в результате проведенных испытаний, с аналогичными характеристиками, заявленными фирмой-изготовителем, несущественны, и классификация по ISO 11699-1:2008 сохраняется. Полное несовпадение возможно по причине того, что испытания проводили на разных типах рентгеновских аппаратов, у которых могут отличаться схема питания, толщина выходного окна и, как следствие, лучевая отдача.

Для более точного определения необходимы набор статистических данных и установление соответствия на 95%-ном доверительном интервале [15].

**Заключения**

1. В результате испытаний сенситометра построены характеристические кривые радиографических пленок D4, D5, D7, по которым определены их свойства в соответствии с регламентом ISO 11699-1:2008.

2. Установлено соответствие радиографических пленок D4, D5, D7 заявленным классам C3, C4, C5 по ISO 11699-1:2008.

3. Разработанный сенситометр может быть использован при испытании радиографических технических пленок по ISO 11699-1:2008 с целью определения их принадлежности к соответствующему классу.

### Благодарность

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» М.А. Далину и В.Ю. Чертищеву за неоценимую помощь в создании сенситометра, посредством которого проведены испытания радиографических пленок.

### Библиографический список

1. ISO 11699-1:2008. Контроль неразрушающий. Рентгенографические пленки для промышленной радиографии. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии. М.: Стандартиформ, 2009. 9 с.
2. ISO 11699-2:2018 Контроль за обработкой пленки посредством эталонных значений. М.: Стандартиформ, 2018. 10 с.
3. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
6. Макаров А.В. Радиографический контроль. Актуальные вопросы, оставшиеся без ответов // Неразрушающий контроль. Точка опоры. 2020. №1. С. 25.
7. Гнедин М.М., Шаблов С.В. Радиографический контроль. Требования по выбору радиографической пленки // В мире неразрушающего контроля. 2019. №2. С. 14–18.
8. Макаров А.В. Некоторые особенности использования ГОСТ 7512–82 и ГОСТ ISO 17636-1 при контроле трубопроводов // В мире неразрушающего контроля. 2019. №2. С. 22–24.
9. Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А., Крупнина О.А., Турбин Е.М. Испытание радиографических пленок для определения возможности их применения для НК изделий авиационной техники // Вестник МГТУ им. Баумана. 2016. Т. 19. №2. С. 61–65.
10. Сорокин А.С., Галкин Д.И., Иванайский Е.А. Количественная оценка информативности радиографического контроля с помощью ROC-анализа // Контроль. Диагностика. 2020. №5. С. 4–11.
11. Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А., Крупнина О.А. Сенситометр для технических радиографических пленок // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-88-94.
12. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
13. Величко В.Я. Параметры качества радиографических изображений по новым стандартам ГОСТ ISO 17636-1-2:2017 // В мире неразрушающего контроля. 2018. №3. С. 46–55.
14. Смирнова Н.И. Новые ГОСТы по радиационному контролю. Росстандарт информирует // В мире неразрушающего контроля. 2019. №1. С. 28–29.
15. 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 (52). С. 65–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-65-79.