

О ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАДИОМЕТРА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Разработана методика определения длительности приемочных испытаний радиометра контроля радиационной обстановки в угольных шахтах. Радиометр представлен в виде системы, состоящей из взаимосвязанных узлов (подсистем) и программного обеспечения. Достоверность результатов измерений обеспечивается оптимальным числом измерений на рабочих местах радиационных показателей в подземных условиях и условиях поверхностного технологического комплекса угольной шахты.

Для проведения промышленных испытаний конкретного изделия разрабатывается программа и методика приемочных испытаний. Такая программа, как правило, разрабатывается на основе типовой программы и методики приемочных испытаний опытных образцов (опытных партий) шахтных приборов, систем и средств безопасности [1].

Типовые программы и методики приемочных испытаний опытных образцов (или образцов из установочной серии), относящиеся к средствам измерений, разрабатываются с учетом ГОСТ 8.001-80 и МУ 8.5-74 [2,3]. Радиометр эквивалентной равновесной объемной активности радона РГА-09МШ, используемый для контроля радиационной обстановки в угольных шахтах, относится к приборам и средствам безопасности, характеризующимися требованиями повышенной надежности и достоверности показателей. Программа и методика приемочных испытаний радиометра должна содержать раздел, устанавливающий определение длительности испытаний радиометра.

Определение длительности испытания производится путем расчета времени испытаний для установленного техническим заданием количества испытываемых образцов, которые необходимы для объективной оценки работоспособности и качества изделия. Этот расчет проводится исходя из минимального времени (машинного или календарного), необходимого для проверки показателя надежности. Расчет длительности испытаний ведется с целью контроля показателя надежности (безотказности), заложенного в техническое задание на разработку изделия.

Испытания для подтверждения заданного в техническом задании значения наработки на отказ планируется по приемочному числу отказов n_{np} с доверительной вероятностью 0,8. С целью сокращения продолжительности испытаний рекомендуется принимать число отказов равными 0 или 1 [1].

При расчете длительности испытаний радиометра РГА-09МШ (который представлен как сложная система, состоящая из нескольких составных частей-подсистем и программного обеспечения) применяется формула [1]:

$$N t_u = a_3 \cdot T, \quad (1)$$

где N – количество изделий, устанавливаемых на испытания, шт.; t_u – продолжительность испытаний одного изделия, ч., (циклов); $N \cdot t_u$ – расчетный объем испытаний, шт.ч.; T – контролируемое значение наработки на отказ, заданное техническим заданием, ч., (циклов); a_0 – коэффициент, зависящий от приемочного числа отказов при экспоненциальном законе распределения наработки между отказами.

Величина наработки на отказ для радиометра T_p , в котором отказ одной из составных частей вызывает потерю работоспособности радиометра, определяется при известных наработках на отказ каждой составляющей части радиометра с помощью формулы [4]:

$$T_p = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \dots + \frac{1}{T_9}} \quad (2)$$

где T_1, \dots, T_9 – наработка на отказ составных частей радиометра.

Продолжительность испытания радиометра РГА-09МШ определяется функциями, при реализации которых принимают участие все составные части радиометра.

Для радиометра РГА-09МШ это следующие функции:

- отбор проб взвешенной пыли шахтного воздуха путем прокачки воздуха через фильтр;

- регистрация альфа-излучения дочерних продуктов распада радона (ДПР) и торона (ДПТ) в шахтном воздухе и взвешенной пыли, которая осела на фильтр во время прокачки через него воздуха, путем непосредственного определения радиометром количества альфа-частиц в установленные промежутки времени;

- автоматическое определение:

- 1) В режиме работы радиометра «Измерение ДПР» путем расчета по количеству зарегистрированных в установленные промежутки времени альфа-частиц дочерних продуктов распада радона, осевших на фильтр, без учета влияния торона (радона-220) (как результат непрямых измерений):

- объемной активности (концентрации) дочерних продуктов распада (ОА ДПР) радона-222 (C_a, C_b, C_c);

- ЭРОА радона-222 ($C_{ДПР}$);

- объемной активности (концентрации) радона $C_{радон}$;

- коэффициента равновесия F между радоном и продуктами его распада;

- кратности воздухообмена λ ;

- 2) В режиме работы радиометра «Измерение ДПТ» путем расчета по количеству зарегистрированных в установленные промежутки времени альфа-частиц дочерних продуктов распада радона, осевших на фильтр, осевших на фильтр, с учетом влияния торона (радона-220) (как результат непрямых измерений):

- объемной активности (концентрации) дочерних продуктов распада (ОА ДПР) радона-222 (C'_a, C'_b, C'_c);

- ЭРОА радона-222 ($C'_{ДПР}$);

ЭРОА торона (радона-220) ($C_{ДПТ}$);
 объемной активности (концентрации) радона $C'_{\text{радон}}$;
 коэффициента равновесия F' между радоном и продуктами его
 распада;

кратности воздухообмена λ' ;

- индикации результатов измерений, информации о результатах измерений в режиме «Архив», выполнения режима «Работа с ПЭВМ», режимов работы и тестирования состояния РГА-09МШ и зарядного устройства ЗУ-05С;
- определения запыленности шахтного воздуха в месте измерения.

Реализация этих функций предусматривает работу в радиометре цепочки следующих составных частей системы:

узел воздуходувки (1 шт.) – усилитель - дискриминатор для альфа-полупроводникового детектора (1 шт.) – предусилитель для альфа - полупроводникового детектора (1 шт.) – узел процессора (1 шт.) – графический дисплей BG12864E “Bolymin”(1 шт.) – канал связи (1 шт.) – органы управления (переключатели-кнопки (4 шт.)) – источник питания (11 элементов Ni-MH) – полупроводниковый детектор (1 шт.). Схема соединения составных частей радиометра РГА-09МШ приведена в Руководстве по эксплуатации радиометра [5]. Величины наработок на отказ для составных частей радиометра РГА-09МШ приведены в табл. 1.

Для выполнения функций, в реализации которых принимают участие все составные части радиометра, расчет наработки на отказ по формуле (2) дает величину $T_p = 34,25$ ч. Длительность испытаний t_u при такой наработке на отказ при числе отказов $n_{np} = 0$, рассчитанная по формуле (1) составляет: $t_u = 1,6 \cdot 34,25 = 54,8$ ч. Учитывая, что рабочая смена в шахте длится 6 часов, количество дней, необходимых для проведения испытаний составляет: $54,8 : 6 = 9,1 \approx 10$ дней. Учитывая необходимость проверки двух методов, реализованных в радиометре (Маркова и Томаса), длительность испытаний удваивается и составляет 20 дней.

Таблица 1 – Величины наработок на отказ составных частей радиометра РГА-09МШ

№ п/п	Обозначение составной части РГА-09МШ	Наименование составной части РГА-09МШ	Наработка на отказ составной части, T_i	
			обозначение	значение, ч
1	<i>A1</i>	Узел воздуходувки	T_1	1000
2	<i>A2</i>	Усилитель-дискриминатор для альфа полупроводникового детектора ППД	T_2	2500
3	<i>A3</i>	Предусилитель для альфа ППД	T_3	5000
4	<i>A4</i>	Узел процессора	T_4	10000
5	<i>A5</i>	Графический дисплей BG12864E “Bolyrin”	T_5	10000

6	A6	Канал связи	T_6	2500
7	A7	Переключатели, кнопки	T_7	1000
8	A8	Источник питания: батарея из 11 последо- вательно соединенных никель-металгидрид- ных аккумуляторов (Ni-MH, типа AA)	T_8	500
9	A9	Альфа полупроводниковый детектор ППД	T_9	1000

Достоверность результатов измерения контролируемых параметров обеспечивается осуществлением достаточного числа измерений. В данной работе на примере измерений на рабочем месте рукоятчика на шахте «Холодная Балка» были проведены исследования по установлению достаточного количества измерений (объема выборки) n , необходимого для достоверной оценки контролируемых радиационных параметров: эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона, ЭРОА торона, объемной активности (концентрации) радона C_{Rn} .

Число измерений n , необходимое для определения среднего уровня ЭРОА радона, ЭРОА торона, концентрации радона C_{Rn} в некотором пункте контроля с относительной погрешностью δ можно оценить с помощью соотношения [6]:

$$n = \frac{1,2 \tau_{p,N} \nu}{\delta} \quad (3)$$

где $\tau_{p,N}$ – значение коэффициента Стьюдента для выбранного уровня доверительной вероятности P и количества измерений N ; коэффициент 1,2 учитывает характерное для обычных условий логнормальное распределение значений измеряемых уровней радиационных показателей; ν – коэффициент вариации измеряемого радиационного показателя.

Типовая программа и методика [1] регламентирует при расчете необходимого числа измерений параметров, имеющих дискретный характер, вероятность безотказной работы изделия при одном испытании в пределах от 0,7 до 0,85. Для параметров, имеющих непрерывный характер, доверительная вероятность измерения принимается в пределах от 0,8 до 0,9.

Если в течение некоторого времени в данном пункте выполнено N измерений уровня радиационных показателей и среднее арифметическое значение полученных значений E_i равно E_{cp} , то значение коэффициента вариации ν равно [6]:

$$n = \frac{1}{E_{cp}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i (E_i - E_{cp})^2} \quad (4)$$

Измерения N уровней ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика проводились с помощью радиометра РГА-09МШ. При этом измерения выполнялись в различные дни, в различное время различных смен при

выполнении различных технологических операций. Концентрация пыли при этом изменялась от 5 до 15 мг/м³. Результаты измерения ЭРОА радона приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерения ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика шахты «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»

№ п/п	Дата замера	N фильтра	ЭРОА радона, (c_i), Бк/м ³	$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$
1	2	3	4	5	6
1	17.07	69	7,174	6,675	44,55
2	13.07	59	11,73	2,119	4,490
3	13.07	60	13,85	0,001	0,000
4	13.07	61	18,91	5,061	25,613
5	13.07	62	13,38	0,469	0,219
6	13.07	63	15,25	1,401	1,963
7	12.07	54	16,69	2,841	8,071
8	12.07	56	18,45	4,601	21,17
9	12.07	57	11,96	1,889	3,568
10	12.07	58	15,26	1,411	1,991
11	06.07	33	9,690	4,159	17,30
Сумма			152,34		128,93
Среднее			13,849		

Количество измерений, необходимое для достоверного определения уровня ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика, вычисленное с помощью формулы (3), при различных значениях доверительной вероятности P приведены в табл. 3. Относительная погрешность принята раной $\delta=50\%$ в соответствии с ГОСТ [7,8]. Эти ГОСТы регламентируют предел основной допускаемой погрешности для измерения активности и объемной активности радионуклида в газах, а также активности радиоактивного аэрозоля равным не более 60%. Для радиометрических установок специального назначения и альфа-радиометров предел допускаемой относительной основной погрешности допускается устанавливать $\pm 50\%$. Значение коэффициента вариации измерений ЭРОА радона на рабочем месте рукоятчика для всего периода измерений рассчитывалось по формуле (4).

Результаты измерения ЭРОА радона, приведенные в табл. 3, анализировались как выполненные в один день, так и за все дни суммарно. Например, обработка результатов за 13.07 показала, что достоверным для $P=0,95$ является количество измерений, равное двум замерам ($n=2$) на рабочем месте рукоятчика. Обобщенные за все дни результаты измерений также показали, что достоверным является количество измерений, равное двум.

Таблица 3 – Количество измерений n на рабочем месте рукоятчика, необходимое для оценки среднего уровня ЭРОА радона

Дата, количество замеров	Коэффициент вариации, v , отн.ед	Доверительная вероятность, P , отн.ед.	Коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$	Расчетное количество измерений, n_p	Принятое количество измерений, n
1	2	3	4	6	7
13.07 $N=5$	0,185	0,95 0,9 0,8	2,776 2,1318	1,519 0,896	2 1 1
12.07 $N=4$	0,176	0,95 0,9 0,8	3,182 2,3534	1,805 0,988	2 1 1
17.07 13.07 12.07 06.07 $N=11$	0,258	0,95 0,9 0,8	2,2281 1,8125 1,3720	1,940 1,270 0,73	2 2 1

Значение коэффициента Стьюдента определяли с помощью таблиц, приведенных в [9]. Результаты измерений ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика приведены в табл. 4.

Количество измерений, необходимое для достоверного определения уровня ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика, вычисленное с помощью формулы (3), при различных значениях доверительной вероятности P , приведены в табл. 5.

Таблица 4 – Результаты измерения ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика шахты «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»

№ п/п	Дата замера	N фильтра	ЭРОА торона, (c_i) , Бк/м ³	$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$
1	13.07	59	3,494	0,455	0,2070
2	13.07	61	1,457	1,582	2,5027
3	13.07	62	2,688	0,351	0,1232
4	13.07	63	3,295	0,256	0,0655
5	13.07	65	1,582	0,127	0,0161
6	14.07		1,604	1,457	2,1228
7	14.07	66	3,166	0,805	0,6480
8	14.07	67	3,844	1,648	2,7159
9	11.07	48	3,373	0,334	0,1115
10	11.07	47	2,875	0,164	0,0268
Сумма			30,39		8,5395
Среднее			3,039		

Таблица 5 – Количество измерений n на рабочем месте рукоятчика, необходимое для оценки среднего уровня ЭРОА торона

Дата, количество замеров	Коэффициент вариации, v , отн.ед.	Доверительная вероятность, P , отн.ед.	Коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$	Расчетное количество измерений, n_p	Принятое количество измерений, n
13.07, 14.07, 11.07, $N=10$	0,304	0,95 0,9 0,8	2,2622 1,8331 1,3830	2,722 1,788 1,000	3 2 1

Значение коэффициента вариации измерений ЭРОА торона на рабочем месте рукоятчика для всего периода измерений рассчитывалось по формуле (4).

Для ЭРОА торона, необходимое количество замеров при доверительной вероятности $P=0,95$ составило 3 измерения, что, вероятно, связано с весьма малыми значениями измеряемых величин.

Результаты измерений объемной активности (концентрации) радона (C_{Rn}) на рабочем месте рукоятчика приведены в табл. 6.

Значение коэффициента вариации измерений объемной активности (концентрации) радона на рабочем месте рукоятчика для всего периода измерений рассчитывалось по формуле (4).

Количество измерений, необходимое для определения уровня объемной активности (концентрации) радона на рабочем месте рукоятчика, вычисленное с помощью формулы (3), при различных значениях доверительной вероятности P приведены в табл. 7.

Таблица 6 – Результаты измерения объемной активности (концентрации) радона (C_{Rn}) на рабочем месте рукоятчика шахты «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»

№ п/п	Дата замера	N фильтра	C_{Rn} , (c_i) , Бк/м ³	Измерения в отдельные дни (13.07 и 12.07)		Измерения за все дни (12-17.07)	
				$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$	$(c_i - \bar{c})$	$(c_i - \bar{c})^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	17.07	69	23,11			1,655	2,722
1	2	3	4	5	6	7	8
2	13.07	59	28,90	3,900	15,27	4,145	17,14
3	13.07	60	19,20	5,859	33,64	5,560	30,91
4	13.07	63	23,10	1,891	3,570	1,661	2,750
5	13.07	31	26,58	1,582	2,491	1,821	3,312
6	13.07	64	27,17	2,175	4,708	2,415	5,808
Сумма за 13.07			$\Sigma=124,9$		$\Sigma=59,6$		
Среднее за 13.07			25,0				
7	12.07	54	23,14	1,623	2,628		
8	12.07	55	21,55	3,214	10,301		
9	12.07	56	31,15	6,393	40,831		

10	12.07	57	28,18	3,421	11,69		
11	12.07	58	20,27	4,490	20,16		
Сумма за 12.07			$\Sigma=124,3$		$\Sigma=85,6$		
Среднее за 12.07			24,85				
Сумма за все дни			272,36				$\Sigma=148,2$
Среднее за все дни			24,76				

Анализ данных табл. 7 показывает, что для измерения объемной активности (концентрации) радона, необходимое количество замеров при доверительной вероятности $P=0,95$ и $P=0,9$ составило 2 измерения, для доверительной вероятности $P=0,8$ достаточно проводить одно измерение.

Выполненные исследования позволили установить, что для рабочего места горняка в угольной шахте, где запыленность не превышает 15 мг/м^3 для доверительной вероятности $P=0,95$ необходимо производить не менее трех измерений суммарной альфа-активности шахтной атмосферы с помощью радиометра РГА-09МШ.

При выполнении предварительных измерений достаточно производить одно измерение (для доверительной вероятности $P=0,8$).

Таблица 7 – Количество измерений n на рабочем месте рукоятчика, необходимое для оценки среднего уровня объемной активности (концентрации) радона

Дата, количество замеров	Коэффициент вариации, v	Доверительная вероятность, P	Коэффициент Стьюдента $t_{p,N}$	Расчетное количество измерений, n_p	Принятое количество измерений, n
13.07 N=5	0,154	0,95	2,776	1,052	2
		0,9	2,1318	0,620	1
		0,8			1
12.07 N=5	0,186	0,95	2,776	1,540	2
		0,9	2,1318	0,905	1
		0,8			1
17.07 13.07 12.07 N=11	0,258	0,95	2,2281	1,940	2
		0,9	1,8125	1,270	2
		0,8	1,3720	0,73	1

Выводы

1. Результаты проведенных исследований позволили разработать методику определения (расчета) длительности приемочных испытаний радиометра эквивалентной равновесной объемной активности радона при контроле радиационной обстановки в угольных шахтах.

2. Достоверность результатов измерений обеспечивается определением необходимого количества измерений радиационных показателей в контролируемых рабочих местах угольных шахт, опасных по газу.

Для измерения ЭРОА радона при доверительной вероятности $P = 0,95$ достаточно производить два измерения, для $P = 0,9$ и $P = 0,8$ – одно измерение.

Для измерения ЭРОА торона при доверительной вероятности $P = 0,95$ необходимо производить три измерения, для $P = 0,9$ – два и $P = 0,8$ – одно измерение.

Для измерения концентрации (объемной активности) радона, при доверительной вероятности $P = 0,95$ и $P = 0,9$ необходимо производить два измерения, для $P = 0,8$ достаточно проводить одно измерение.

Список литературы:

1 Типовая программа и методика приемочных испытаний опытных образцов (опытных партий) изделий шахтной автоматики. РД 12.48.26-79.- М.: Гипроуглеавтоматизация.- 1979.- 40 с.

2 ГОСТ 8.001-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений. М. – 1983.

3 МУ 8.5-74 Методические указания по разработке и утверждению типовых программ государственных приемочных испытаний средств измерений. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС). – М: Издательство стандартов.– 1975. – 7 с.

4 Коваль А.М. Техническое обслуживание и ремонт горношахтного оборудования / А.М. Коваль, М.И. Горлин, В.И. Чекавский и др. – М.: Недра, 1987. – 344с.

5 Радиометр эквивалентной равновесной объемной активности радона РГА-09МШ (РГА-09МШ1). Руководство по эксплуатации АЖАХ.412123.008РЭ. – ООО НПП «Тетра», г. Желтые Воды. – 2012. – 26 с.

6 МУ 2.6.1.11-01 Организация радиационного контроля на урановых рудниках и расчет доз облучения персонала [Электронный ресурс]: Методическое обеспечение радиационного контроля на предприятии. – Министерство РФ по атомной энергии; Министерство здравоохранения РФ; Федеральное управление медико-биологических и экстремальных проблем. – Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. – М.: Том 4, 2004. – Режим доступа к документу: <http://www.opengost.ru//2878-mu-2.6.1.11-01-organizaciya-radiacionnogo-kontrolya>.

7 ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия (СТ СЭВ 4666-84, СТ СЭВ 6061-87). – М.: Государственный Комитет по стандартам. – 1989.

8 ГОСТ 28271-89 Приборы радиометрические и дозиметрические носимые. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ. – 2004.

9 Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум): Учебное пособие / Бородюк В.П., Волошин А.П., Иванов А.З. и др.; Под редакцией Г.К. Круга. – М.: Высш. школа. – 1983. – 216 с.