

## **ФЕДИНГ-КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАНИЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТЕКЛЯННЫХ ДОЗИМЕТРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА СО ПД (ДТС)-0.05/10 В ИНТЕРВАЛЕ ПОСТОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ 1 ДО 100 СУТОК**

**А. С. Кошелев, Е. Ю. Тарасова, П. Ю. Лапин, А. Е. Никифоров**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 04.07.2019, после доработки – 21.08.2019, принята к публикации – 04.10.2019

Представлены результаты экспериментального исследования постоблучательного изменения (фединга) показаний дозиметров типа СО ПД (ДТС) в интервале от 1 до 100 суток после радиационного нагружения реакторными (БР-К1) и тормозными (ЛУ-10-20) гамма-квантами в интервале поглощенных доз от 50 Гр (вода) до 10 кГр (вода). Предложен формализм коррекции фединга дозовых показаний дозиметров, основанный на использовании степенной и логарифмической форм функциональной зависимости для отношений коэффициента светопропускания, обусловленного радиационной нагрузкой, и его значениями, определяемыми в произвольные моменты времени по окончанию облучения.

**Ключевые слова:** твердотельный стеклянный дозиметр СО ПД (ДТС)-0.05/10, постоблучательное изменение показаний дозиметра (фединг), спектрофотометр цифровой, коэффициент светопропускания, функционал изменения коэффициента светопропускания, функционал коррекции изменения коэффициента светопропускания.

**FADING-CORRECTION OF READINGS OF GLASS GAMMA-RADIATION DOSIMETERS SO PD (DTS)-0.05/10 WITHIN THE INTERVAL OF POST-IRRADIATION MEASUREMENTS FROM 1 TO 100 DAYS / A. S. KOSHELEV, E. Yu. TARASOVA, P. Yu. LAPIN, A. E. NIKIFOROV** // There are presented the results of experimental study of post-irradiation variation (fading) of SO PD (DTS) dosimeter readings within the interval from 1 to 100 days after radiation loading by reactor (BR-K1) and bremsstrahlung (LU-10-20) gamma-quanta within the interval of absorbed doses from 50 Gy (*water*) to 10 kGy (*water*). There is advanced a formalism for fading-correction of dosimeter dose readings based on the application of degree and logarithmic forms of functional dependence for the ratios of light-transmission coefficient conditioned by radiation loading and its values obtained at arbitrary time points after irradiation is completed.

**Key words:** solid-state glass dosimeter SO PD (DTS)-0.05/10, post-irradiation variation of dosimeter readings (fading), digital spectrophotometer, light-transmission coefficient, functional of light-transmission coefficient variation, functional of light-transmission coefficient variation correction.

### **Введение**

В арсенале средств метрологического контроля дозовых параметров радиационного воздействия  $\gamma$ -составляющей в полях  $n$ - $\gamma$ -излучений реакторных установок ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в качестве интегрального детек-

тора сопровождения облучательных процедур наибольшее распространение получили детекторы из силикатного стекла с добавкой никеля, изменяющие окраску в процессе облучения [1, 2]. В первоначальном варианте указанные детекторы, изготовленные в виде квадратных стеклянных пластинок  $15 \times 15$  мм<sup>2</sup>,

толщиной 5 мм, получили наименование ДТС-0.01/1.0. В настоящее время усовершенствованный вариант аналогичных детекторов, изготавливаемый и аттестуемый ФГУП «ВНИИФТРИ», получил наименование СО ПД (ДТС)-0.05/10. Измерительный диапазон поглощенной  $\gamma$ -дозы для детекторов данного типа – от 50 до 500 Гр (вода) при спектрофотометрическом измерении постоблучательного изменения оптической плотности стекла на длине волны 360 нм, от 1 до 10 кГр (вода) – на длине волны 745 нм.

Авторы работ [1, 2] отмечают, что вызванное облучением окрашивание неустойчиво и имеет тенденцию к уменьшению окраски вплоть до ее полного возвращения в исходное состояние. Авторы [2] используют определенный формализм учета изменения постоблучательной оптической плотности детектора ДТС-0.01/1, не дающий, однако, никаких доказательств его независимости как от длительности интервала постоблучательной задержки измерений, так и от уровня радиационного воздействия в пределах соответствующего измерительного интервала.

В сопроводительной документации на поставляемые комплекты детекторов типа СО ПД (ДТС)-0.05/10 конкретизируется только аттестационно устанавливаемая функциональная связь между постоблучательными оптическими параметрами детектора (коэффициент светопропускания  $T$  в %, оптическая плотность  $A = \log(100/T)$ ) и поглощенной им дозой при проведении соответствующих спектрофотометрических измерений в интервале от 22 до 26 часов по окончании облучения. Рекомендаций по учету отклонения от установленного срока проведения постоблучательных измерений штатный комплект сопроводительной документации не содержит.

По итогам ряда фрагментарно выполненных экспериментальных исследований нам удалось получить репрезентативно ограниченную, но методически значимую информацию о характере и параметрах постоблучательного изменения показаний СО ПД (ДТС)-0.05/10, достаточную для оптимизационного выбора корректируемого функционального параметра

и конкретизации его функциональной формализации в измерительном интервале до 100 суток по завершении облучения.

### **Избранный корректируемый параметр и избранные результаты эксперимента**

Процедура определения поглощенной дозы с помощью СО ПД в редакции разработчика дозиметров «ФГУП ВНИИФТРИ» включает в себя три этапа:

– измерение постоблучательного коэффициента светопропускания  $T_w$  в % (индекс  $w$  предлагается нами для идентификации показаний в произвольный момент времени  $t_w$ , отсчитываемый от момента конца облучения; от английского *watch* – наблюдать);

– определение постоблучательной оптической плотности по соотношению  $A_w = \log(100/T_w)$ ;

– определение поглощенной в процессе облучения дозы  $D$  с использованием аттестационно установленных функциональных связей с оптической плотностью, определенной в фиксированном интервале от 22 до 26 часов по завершении облучения (для указанной величины мы используем обозначение  $A_v$ ; индекс  $v$  от английского *valid* – правильный).

Предварительный анализ имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных данных показал возможность формализации фединг-эффекта как для каждого индивидуального параметра (коэффициент светопропускания  $T$ , оптическая плотность  $A$ , поглощенная доза  $D$ ), так и для функциональных параметров  $T_v/T_w$ ,  $A_w/A_v$  и  $D_w/D_v$ . В качестве наиболее оптимального параметра для формализации фединг-эффекта в интересах его эффективной коррекции в практически значимом интервале постоблучательных измерений нами был избран функциональный параметр  $T_v/T_w$ , позволяющий использовать данные прямых измерений, он наиболее зависим от уровня дозового нагружения. В пользу сделанного выбора говорит также очевидное тер-

минологическое соответствие между уменьшением функционального параметра  $T_v/T_w$  и федингом радиационного окрашивания (от английского *fading* – потеря окраски, обесцвечивание).

Избранные результаты эксперимента для анализа функционального параметра  $T_v/T_w$  в интервале дозовой нагрузки от 50 до 500 Гр (вода) представлены в табл. 1. Облучение де-

сяти дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10 осуществлено одновременно в кратковременном энергопуске реактора БР-К1 длительностью ~20 мин. Дозиметры размещались во внутризонной облучательной полости активной зоны реактора [3] в позиционной конфигурации, обеспечивающей запланированную дискретизацию исследуемого измерительного интервала поглощенных доз.

Таблица 1

Выборка данных для анализа фединга функционального параметра  $T_v/T_w$  в интервале дозовой нагрузки 50–500 Гр (вода)

$t_w$ , сут	$T_w$ , %	$T_v/T_w$	$t_w$ , сут	$T_w$ , %	$T_v/T_w$
$t_v = 1$ сут, $T_v = 65,05$ %, $D_v = 66,3$ Гр (вода)					
1,91	65,3	0,9962	35,0	66,3	0,9811
2,92	65,5	0,9931	41,9	66,3	0,9811
5,99	65,7	0,9901	50,0	66,4	0,9797
9,00	65,8	0,9886	60,0	66,5	0,9782
15,0	66,0	0,9856	79,0	66,6	0,9767
21,0	66,1	0,9841	100,0	66,7	0,9753
28,0	66,2	0,9826	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 52,9$ %, $D_v = 107,3$ Гр (вода)					
1,91	53,2	0,9944	35,0	54,5	0,9706
2,92	53,3	0,9925	41,9	54,6	0,9689
5,99	53,6	0,9869	50,0	54,7	0,9671
9,00	53,8	0,9833	60,0	54,8	0,9653
15,0	54,0	0,9796	79,0	55,0	0,9618
21,0	54,2	0,9760	100,0	55,1	0,9601
28,0	54,3	0,9742	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 42,3$ %, $D_v = 151,9$ Гр (вода)					
1,91	42,5	0,9953	35,0	44,2	0,9570
2,92	42,7	0,9906	41,9	44,3	0,9549
5,99	43,1	0,9814	50,0	44,4	0,9527
9,00	43,3	0,9769	60,0	44,6	0,9484
15,0	43,6	0,9702	79,0	44,8	0,9442
21,0	43,8	0,9658	100,0	44,9	0,9421
28,0	44,0	0,9614	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 31,45$ %, $D_v = 211,3$ Гр (вода)					
1,91	31,8	0,9890	35,0	33,5	0,9388
2,92	32,0	0,9828	41,9	33,6	0,9360
5,99	32,4	0,9707	50,0	33,7	0,9332
9,00	32,6	0,9647	60,0	33,9	0,9277
15,0	32,8	0,9588	79,0	34,0	0,9250
21,0	33,0	0,9530	100,0	34,2	0,9196
28,0	33,2	0,9473	–	–	–

$t_w$ , сут	$T_w$ , %	$T_v/T_w$	$t_w$ , сут	$T_w$ , %	$T_v/T_w$
$t_v = 1$ сут, $T_v = 24,6$ %, $D_v = 260,0$ Гр (вода)					
1,91	24,9	0,9880	35,0	26,5	0,9283
2,92	25,1	0,9801	41,9	26,7	0,9213
5,99	25,4	0,9685	50,0	26,8	0,9179
9,00	25,6	0,9609	60,0	26,8	0,9179
15,0	25,9	0,9498	79,0	27,0	0,9111
21,0	26,1	0,9425	100,0	27,2	0,9044
28,0	26,3	0,9354	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 18,35$ %, $D_v = 318,9$ Гр (вода)					
1,91	18,6	0,9866	35,0	20,1	0,9129
2,92	18,8	0,9761	41,9	20,2	0,9084
5,99	19,1	0,9607	50,0	20,4	0,8995
9,00	19,3	0,9508	60,0	20,6	0,8908
15,0	19,6	0,9362	79,0	20,7	0,8865
21,0	19,8	0,9268	100,0	20,9	0,8780
28,0	20,0	0,9175	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 14,4$ %, $D_v = 366,7$ Гр (вода)					
1,91	14,7	0,9796	35,0	16,1	0,8944
2,92	14,9	0,9664	41,9	16,2	0,8889
5,99	15,2	0,9474	50,0	16,3	0,8834
9,00	15,4	0,9351	60,0	16,5	0,8727
15,0	15,6	0,9231	79,0	16,6	0,8675
21,0	15,8	0,9114	100,0	16,8	0,8571
28,0	16,0	0,9000	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 11,9$ %, $D_v = 404,7$ Гр (вода)					
1,91	12,2	0,9754	35,0	13,5	0,8815
2,92	12,4	0,9597	41,9	13,6	0,8750
5,99	12,7	0,9370	50,0	13,8	0,8623
9,00	12,8	0,9297	60,0	13,9	0,8561
15,0	13,1	0,9084	79,0	14,0	0,8500
21,0	13,2	0,9015	100,0	14,2	0,8380
28,0	13,4	0,8881	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 9,46$ %, $D_v = 450,9$ Гр (вода)					
1,91	9,70	0,9753	35,0	10,9	0,8679
2,92	9,80	0,9653	41,9	11,0	0,8600
5,99	10,1	0,9366	50,0	11,1	0,8523
9,00	10,3	0,9184	60,0	11,2	0,8446
15,0	10,5	0,9010	79,0	11,3	0,8372
21,0	10,7	0,8841	100,0	11,5	0,8226
28,0	10,8	0,8759	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 7,605$ %, $D_v = 494,4$ Гр (вода)					
1,91	7,81	0,9738	35,0	8,925	0,8521
2,92	7,94	0,9578	41,9	9,02	0,8431
5,99	8,19	0,9286	50,0	9,09	0,8366
9,00	8,37	0,9086	60,0	9,20	0,8266
15,0	8,55	0,8895	79,0	9,31	0,8169
21,0	8,69	0,8751	100,0	9,42	0,8073
28,0	8,81	0,8632	–	–	–

Численные значения коэффициентов светопропускания  $T_v$ , представленные в табл. 1, соответствуют результатам измерений в интервале 22–26 ч (0,92–1,08 сут) от конца соответствующего облучения. Представленные там же численные значения  $D_v$  определены с использованием аттестационного функционала  $D_v = 459A_v - 19,6$  Гр (вода).

Избранные результаты эксперимента для анализа функционального параметра  $T_v/T_w$  в интервале дозовой нагрузки от 1 до 10 кГр (вода) представлены в табл. 2. Облучение четырех дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10 осуществлено одновременно в четырех пусках

ускорителя ЛУ-10-20 [4]. В каждом пуске дозиметры размещались в одинаково фиксированной позиции в поле тормозного излучения электронного пучка ускорителя. Уровень дозового нагружения варьировался длительностью пуска от ~2 до ~10 мин.

Численные значения коэффициентов светопропускания  $T_v$ , представленные в табл. 2, соответствуют результатам измерений в интервале 22–26 ч (0,92–1,08 сут) от конца соответствующего облучения. Представленные там же численные значения  $D_v$  определены с использованием аттестационного функционала  $D_v = 37,82A_v^{2,54}$  кГр (вода).

Таблица 2

*Выборка данных для анализа фединга функционального параметра  $T_v/T_w$  в интервале дозовой нагрузки 1–10 кГр(вода)*

$t_w$ , сут	$T_w$ , %	$T_v/T_w$	$t_w$ , сут	$T_w$ , %	$T_v/T_w$
$t_v = 1$ сут, $T_v = 48,7$ %, $D_v = 1,970$ кГр (вода)					
2,01	49,1	0,9919	15,0	50,5	0,9644
3,01	49,3	0,9878	21,0	50,8	0,9587
4,01	49,5	0,9838	30,0	51,05	0,9540
7,01	49,95	0,9750	45,0	51,5	0,9456
9,01	50,2	0,9701	67,0	51,7	0,9420
11,0	50,4	0,9663	98,0	52,1	0,9347
$t_v = 1$ сут, $T_v = 34,1$ %, $D_v = 5,475$ кГр (вода)					
2,08	35,0	0,9743	27,1	38,4	0,8880
3,08	35,5	0,9606	34,1	38,8	0,8789
6,08	36,5	0,9342	41,9	38,9	0,8766
8,08	36,9	0,9241	49,9	39,0	0,8744
10,1	37,0	0,9216	70,9	39,5	0,8633
15,1	37,6	0,9069	98,0	39,8	0,8568
21,1	38,1	0,8950	–	–	–
$t_v = 1$ сут, $T_v = 25,7$ %, $D_v = 9,904$ кГр (вода)					
1,99	26,6	0,9662	15,0	29,6	0,8682
2,99	27,1	0,9483	21,0	30,3	0,8482
3,99	27,6	0,9312	30,0	30,7	0,8371
6,99	28,4	0,9049	45,0	31,5	0,8159
8,99	28,9	0,8893	67,0	32,2	0,7981
11,0	29,2	0,8801	98,0	33,0	0,7788
$t_v = 1$ сут, $T_v = 24,4$ %, $D_v = 10,89$ кГр (вода)					
2,00	25,3	0,9644	15,0	28,4	0,8592
2,99	25,9	0,9421	21,0	29,1	0,8385
3,98	26,25	0,9295	30,0	29,6	0,8243
7,00	27,2	0,8971	45,0	30,3	0,8053
8,99	27,55	0,8857	67,0	31,0	0,7871
11,0	28,0	0,8714	98,0	31,8	0,7673

Различия в систематике дискретизации шкал  $D_v$  и  $t_w$  в различающихся измерительных диапазонах поглощенной дозы обусловлены фрагментарным характером проведенных экспериментальных исследований.

### Фединг-анализ в диапазоне поглощенных доз 50–500 Гр (вода)

Целью анализа фединга функционального параметра  $T_v/T_w$  являлся поиск формы функциональной зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$  для каждой из десяти частных выборок соответствующих данных, представленных в табл. 1, с последующим поиском возможной зависимости установленных частных функционалов от уровня дозовой нагрузки.

Для достижения указанной цели использовался комбинированный подход, включающий в себя построение в *Excel*-среде табличных зависимостей  $T_v/T_w$  от  $t_w$  с последующим поиском аналитических *Excel*-аппроксимаций

мант с максимальной достоверностью аппроксимации  $R^2$ .

Результаты применения оговоренного комбинированного подхода к десяти частным выборкам данных для  $T_v/T_w$  из табл. 1 в графической форме представлены на рис. 1. Рис. 1,а иллюстрирует возможности и качество аппроксимации численных массивов частных выборок  $T_v/T_w$  при поиске аппроксимационного решения в степенной форме, конкретизируемого соотношением

$$\frac{T_v}{T_w} = C_d t_w^{-d}. \quad (1)$$

Рис. 1,б иллюстрирует возможности и качество аппроксимации численных массивов частных выборок  $T_v/T_w$  при поиске аппроксимационного решения в логарифмической форме, конкретизируемого соотношением

$$\frac{T_v}{T_w} = C_m - m \ln t_w. \quad (2)$$

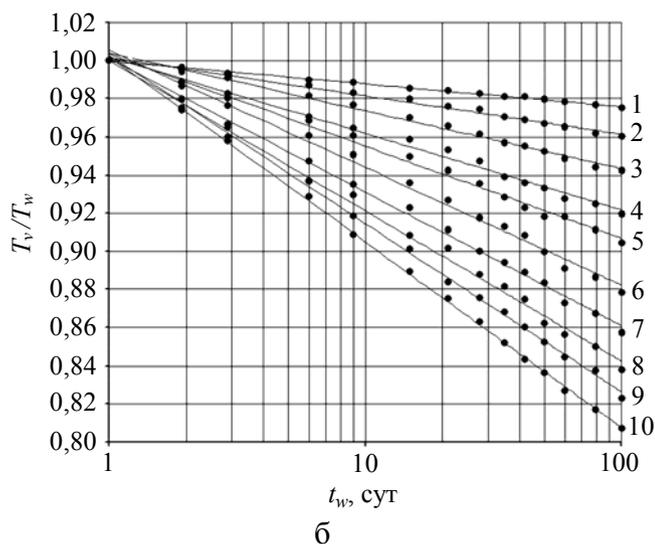
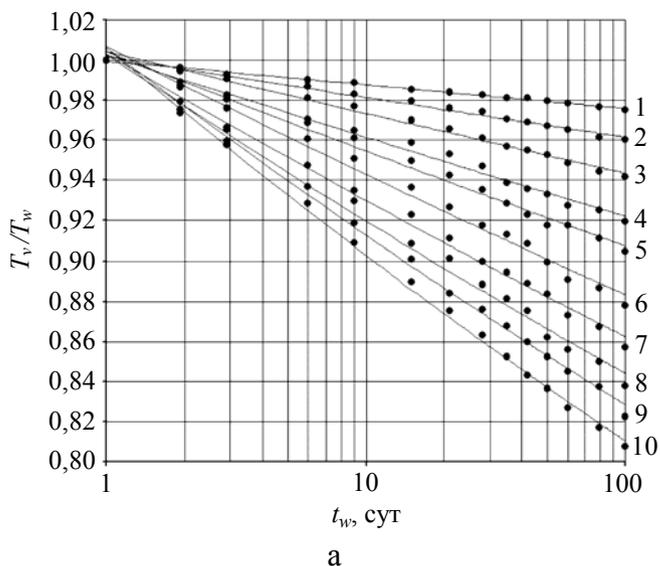


Рис. 1. Фединг функционального параметра  $T_v/T_w$  в интервале дозовой нагрузки от 50 до 500 Гр (вода) и постоблучательной выдержки от 1 до 100 сут (маркеры – экспериментальные данные, сплошные линии: а – результаты их аппроксимации в степенном формате, б – результаты их аппроксимации в логарифмическом формате). 1 –  $D_v = 66,3$  Гр, 2 –  $D_v = 107,3$  Гр, 3 –  $D_v = 151,9$  Гр, 4 –  $D_v = 211,3$  Гр, 5 –  $D_v = 260,0$  Гр, 6 –  $D_v = 318,9$  Гр, 7 –  $D_v = 366,7$  Гр, 8 –  $D_v = 404,7$  Гр, 9 –  $D_v = 450,9$  Гр, 10 –  $D_v = 494,4$  Гр

Особенности количественной вариативности численных параметров  $C_d$ ,  $d$  и  $C_m$ ,  $m$  в зависимости от уровня дозовой нагрузки иллюстрируют представленные в табл. 3 *Excel*-аппроксимационные решения с конкретизированными числовыми значениями указанных параметров для каждой частной выборки  $T_v/T_w$  из табл. 1. Представленные в табл. 3 аппроксимационные результаты показывают следующее:

– уровни аппроксимационной достоверности степенного и логарифмического решений практически одинаковы; частные значения достоверности аппроксимации  $R^2$  для всех полученных аппроксимационных решений

фактически не менее 0,99 при средних значениях для степенной и логарифмической форм решений 0,9929 и 0,9947, соответственно;

– численные значения параметров  $C_d$  и  $C_m$  практически равны 1 с небольшим уровнем вариативности около нее независимо от уровня дозового нагружения;  $\overline{C_d} = 1,0037$  в границах вариативности от 0,9996 до 1,0069,  $\overline{C_m} = 1,0021$  в границах вариативности от 0,9996 до 1,0053;

– зависимость параметров  $d$  и  $m$  системна и значительна; при реализованном изменении дозовой нагрузки в 7,5 раза (от 66,3 до 494,4 Гр) показатель степени  $d$  увеличивается в 9 раз, а множитель  $m$  перед логарифмом – в 7,4 раза.

Таблица 3

*Excel*-аппроксимационные решения для фединга функционального параметра  $T_v/T_w$

$T_v$ , %	Степенная аппроксиманта		Логарифмическая аппроксиманта	
	Функционал, $T_v/T_w$	$R^2$	Функционал, $T_v/T_w$	$R^2$
65,05	$0,9996t_w^{-0,0052}$	0,9964	$0,9996 - 0,0052 \ln t_w$	0,9964
52,9	$1,0016t_w^{-0,0089}$	0,9902	$1,0015 - 0,0087 \ln t_w$	0,9912
42,3	$1,0042t_w^{-0,0135}$	0,9904	$1,0038 - 0,0131 \ln t_w$	0,9918
31,45	$1,0025t_w^{-0,0181}$	0,9900	$1,0019 - 0,0174 \ln t_w$	0,9917
24,6	$1,0043t_w^{-0,0221}$	0,9906	$1,0033 - 0,0210 \ln t_w$	0,9926
18,35	$1,0069t_w^{-0,0285}$	0,9895	$1,0053 - 0,0267 \ln t_w$	0,9926
14,4	$1,0030t_w^{-0,0328}$	0,9949	$1,0010 - 0,0304 \ln t_w$	0,9971
11,9	$1,0025t_w^{-0,0374}$	0,9928	$1,0000 - 0,0342 \ln t_w$	0,9953
9,46	$1,0059t_w^{-0,0422}$	0,9966	$1,0027 - 0,0383 \ln t_w$	0,9984
7,605	$1,0060t_w^{-0,0470}$	0,9976	$1,0021 - 0,0422 \ln t_w$	0,9994

Замена процентного формата представления  $T_v$  в табл. 3 на относительный и применение *Excel*-аппроксимационного подхода к поиску функциональных зависимостей представленных в этой же таблице параметров  $d$  и  $m$  от  $T_v$ , позволяет конкретизировать следующие функциональные соотношения:

$$d = -0,0037 \cdot (1 + 5,20 \ln T_v) \quad (3)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9974$ ;

$$m = -0,0022 \cdot (1 + 7,63 \ln T_v) \quad (4)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9990$ .

В практическом аспекте, безусловно, полезно иметь общее представление об уровнях влияния фединг-эффекта на дозовые величины, определяемые по наблюдаемым значениям  $T_w$  в различные моменты  $t_w$  постоблучательных измерений. Соотношения (1), (2) совместно с (3), (4) позволяют осуществить количественную оценку упомянутого представления.

Нами был выполнен вариант такой оценки, включающий в себя пять степенных фе-

динг-функционалов, сформированных с использованием соотношений (1), (3) и аттестационной связи  $D$  с  $T$  для дозовых нагрузок 50, 65, 100, 200 и 500 Гр (вода). На основании полученных результатов, представленных в графической форме на рис. 2, влияние фединг-эффекта на дозовые показания дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10 в диапазоне поглощенных доз от 50 до 500 Гр (вода) можно оценить как умеренное, особенно в первые 10 сут по окончании облучения. Использование показаний дозиметров, полученных по прошествии более 10 сут от конца облучения, методически нецелесообразно.

### Фединг-анализ в диапазоне поглощенных доз 1–10 кГр (вода)

Целью анализа фединга функционального параметра  $T_v/T_w$  являлся поиск формы функциональной зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$  для каждой из четырех частных выборок соответствующих данных, представленных в табл. 2, с последующим поиском возможной зависимости установленных частных функционалов от уровня дозовой нагрузки.

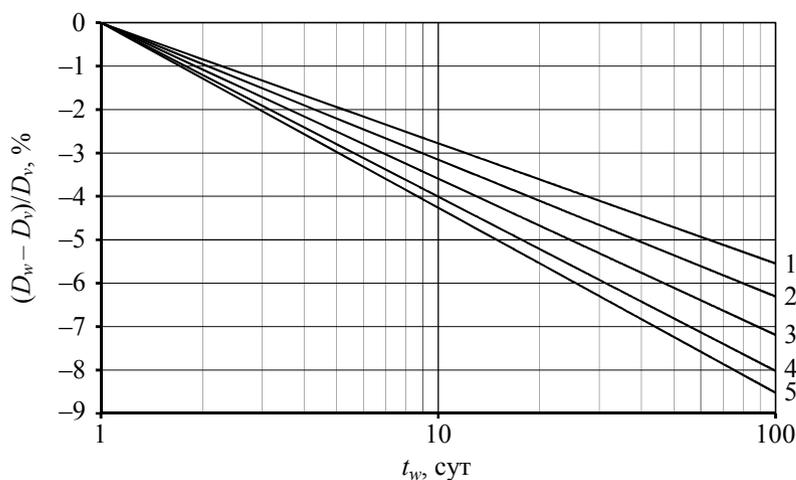


Рис. 2. Влияние фединг-эффекта на расхождение реальных  $D_v$  и наблюдаемых  $D_w$  дозовых величин на постоблучательном интервале измерений  $t_w$  от 1 до 100 сут (степенной формат фединг-функционалов):

1 –  $D_v = 50$  Гр, 2 –  $D_v = 65$  Гр, 3 –  $D_v = 100$  Гр, 4 –  $D_v = 200$  Гр, 5 –  $D_v = 500$  Гр

Для достижения указанной цели использовался комбинированный подход, включающий в себя построение в *Excel*-среде табличных зависимостей  $T_v/T_w$  от  $t_w$  с последующим поиском аналитических *Excel*-аппроксимант с максимальной достоверностью аппроксимации  $R^2$ .

Результаты применения оговоренного комбинированного подхода к четырем частным выборкам данных для  $T_v/T_w$  из табл. 2 в графической форме представлены на рис. 3. Рис. 3,а иллюстрирует возможности и качество аппроксимации численных массивов частных выборок  $T_v/T_w$  при поиске аппроксимационного решения в степенной форме, конкретизируемого соотношением (1). Рис. 3,б иллюстрирует возможности и качество аппроксимации численных массивов частных выборок  $T_v/T_w$  при поиске аппроксимационного решения в логарифмической форме, конкретизируемого соотношением (2).

Особенности количественной вариативности численных параметров  $C_d$ ,  $d$  и  $C_m$ ,  $m$  в зависимости от уровня дозовой нагрузки иллюстрируют представленные в табл. 4 *Excel*-аппроксимационные решения с конкретизи-

рованными числовыми значениями указанных параметров для каждой частной выборки  $T_v/T_w$  из табл. 2. Представленные в табл.4 аппроксимационные результаты показывают следующее:

- уровни аппроксимационной достоверности степенного и логарифмического решений практически одинаковы; частные значения достоверности аппроксимации  $R^2$  для всех полученных аппроксимационных решений фактически не менее 0,99 при средних значениях для степенной и логарифмической форм решений 0,9969 и 0,9963, соответственно;

- численные значения параметров  $C_d$  и  $C_m$  практически равны 1 с небольшим уровнем вариативности около нее независимо от уровня дозового нагружения;  $\overline{C_d} = 1,0012$  в границах вариативности от 0,9949 до 1,0037,  $\overline{C_m} = 0,9977$  в границах вариативности от 0,9921 до 1,0023;

- зависимость параметров  $d$  и  $m$  системна и значительна; при реализованном изменении дозовой нагрузки в 5,5 раза (от 1,970 до 10,89 кГр) показатель степени  $d$  увеличивается в 7,5 раза, а множитель  $m$  перед логарифмом – в 6,7 раза.

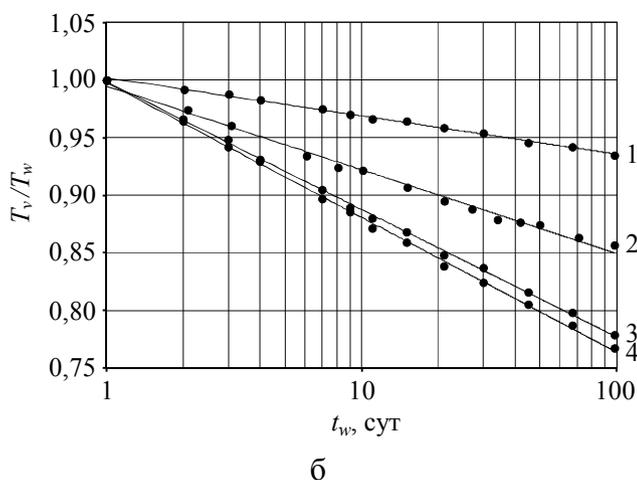
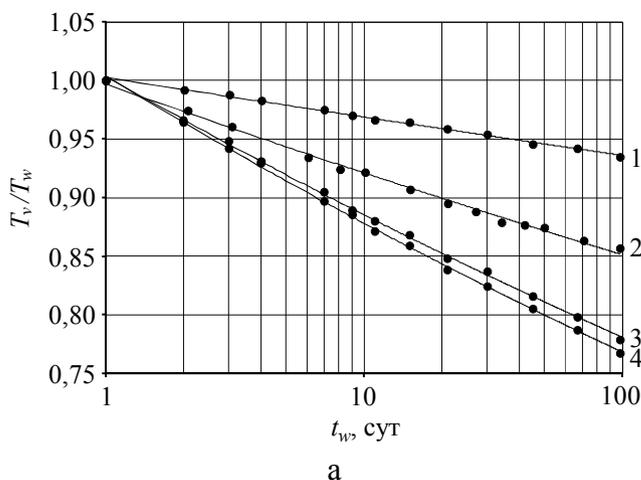


Рис. 3. Фединг функционального параметра  $T_v/T_w$  в интервале дозовой нагрузки от 2 до 10 кГр (вода) и постоблучательной выдержки от 1 до 100 сут (маркеры – экспериментальные данные, сплошные линии: а – результаты их аппроксимации в степенном формате, б – результаты их аппроксимации в логарифмическом формате). 1 –  $D_v = 1,970$  кГр, 2 –  $D_v = 5,475$  кГр, 3 –  $D_v = 9,904$  кГр, 4 –  $D_v = 10,89$  кГр

Excel-аппроксимационные решения для фединга функционального параметра  $T_v/T_w$ 

$T_v$ , %	Степенная аппроксиманта		Логарифмическая аппроксиманта	
	Функционал $T_v/T_w$	$R^2$	Функционал $T_v/T_w$	$R^2$
48,7	$1,0027t_w^{-0,0150}$	0,9952	$1,0023 - 0,0145 \ln t_w$	0,9960
34,1	$0,9949t_w^{-0,0337}$	0,9940	$0,9921 - 0,0308 \ln t_w$	0,9915
25,7	$1,0037t_w^{-0,0545}$	0,9989	$0,9985 - 0,0481 \ln t_w$	0,9990
24,4	$1,0036t_w^{-0,0580}$	0,9993	$0,9979 - 0,0509 \ln t_w$	0,9988

Замена процентного формата представления  $T_v$  в табл. 4 на относительный и применение Excel-аппроксимационного подхода к поиску функциональных зависимостей представленных в этой же таблице параметров  $d$  и  $m$  от  $T_v$  позволяет конкретизировать следующие функциональные соотношения:

$$d = -0,0313 \cdot (1 + 2,01 \ln T_v) \quad (5)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9929$ ;

$$m = -0,0246 \cdot (1 + 2,16 \ln T_v) \quad (6)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9948$ .

В практическом аспекте, безусловно, полезно иметь общее представление об уровнях влияния фединг-эффекта на дозовые величины, определяемые по наблюдаемым значениям  $T_w$  в различные моменты  $t_w$  постоблучательных измерений. Соотношения (1), (2) совместно с (5), (6) позволяют осуществить количественную оценку упомянутого представления.

Нами был выполнен вариант такой оценки, включающий в себя шесть степенных фединг-функционалов, сформированных с использованием соотношений (1), (5) и аттестационной связи  $D$  с  $T$  для дозовых нагрузок 1,0; 1,4; 2,0; 3,0; 5,0 и 10,0 кГр (вода). Полученные результаты в графической форме представлены на рис. 4.

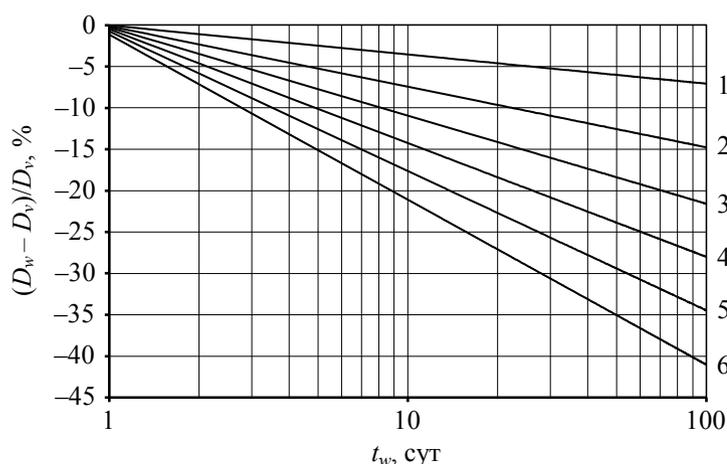


Рис. 4. Влияние фединг-эффекта на расхождение реальных  $D_v$  и наблюдаемых  $D_w$  дозовых величин на постоблучательном интервале измерений  $t_w$  от 1 до 100 сут (степенной формат фединг-функционалов): 1 –  $D_v = 1,0$  кГр, 2 –  $D_v = 1,4$  кГр, 3 –  $D_v = 2,0$  кГр, 4 –  $D_v = 3,0$  кГр, 5 –  $D_v = 5,0$  кГр, 6 –  $D_v = 10,0$  кГр

На основании представленных результатов влияние фединг-эффекта на дозовые показания дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10 в диапазоне поглощенных доз от 1 до 10 кГр можно оценить как значительное. В методическом плане фединг-корректировка целесообразна даже при снятии показаний дозиметров через двое суток по окончании облучения.

### Формализм фединг-коррекции. Варианты. Качество

По результатам анализа фединг-зависимости функционального параметра  $T_v/T_w$  от  $t_w$  и  $T_v$  для интервала поглощенных доз от 50 до 500 Гр (вода) введем в рассмотрение множитель фединг-коррекции  $K(t_w, T_v)$ , путем очевидной комбинации соотношений (1), (2), (3), (4) определив его равным

$$K_d(t_w, T_v) = t_w^{-d(T_v)} = t_w^{0,0037(1+5,20 \ln T_v)} \quad (7)$$

для степенной формы зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$  и

$$\begin{aligned} K_m(t_w, T_v) &= 1 - m(T_v) \ln t_w = \\ &= 1 + 0,0022(1 + 7,63 \ln T_v) \ln t_w \end{aligned} \quad (8)$$

для логарифмической формы зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$ .

По результатам анализа фединг-зависимости функционального параметра  $T_v/T_w$  от  $t_w$  и  $T_v$  для интервала поглощенных доз от 1 до 10 кГр (вода) введем в рассмотрение множитель фединг-коррекции  $K(t_w, T_v)$ , путем очевидной комбинации соотношений (1), (2), (5), (6) определив его равным

$$K_d(t_w, T_v) = t_w^{-d(T_v)} = t_w^{0,0313(1+2,01 \ln T_v)} \quad (9)$$

для степенной формы зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$  и

$$\begin{aligned} K_m(t_w, T_v) &= 1 - m(T_v) \ln t_w = \\ &= 1 + 0,0246(1 + 2,16 \ln T_v) \ln t_w \end{aligned} \quad (10)$$

для логарифмической формы зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$ .

Введение множителя фединг-коррекции  $K(t_w, T_v)$  позволяет конкретизировать процедуру определения коэффициента светопропускания  $T_v$ , необходимого для определения истинной дозовой нагрузки  $D_v$ , с использованием его наблюдаемых значений  $T_w$  в интервале постоблучательной выдержки до 100 сут, организовав ее в форме численных расчетов по следующим соотношениям:

$$T_{wv} = T_w K_d(t_w, T_v) = T_w t_w^{-d(T_v)} \quad (11)$$

для степенной формы зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$  и

$$T_{wv} = T_w K_m(t_w, T_v) = T_w (1 - m(T_v) \ln t_w) \quad (12)$$

для логарифмической формы зависимости  $T_v/T_w$  от  $t_w$ .

Введение индекса  $wv$  вместо  $v$  сделано для различия непосредственно измеренных величин  $T_v$  и их откорректированных аналогов, определенных с использованием наблюдаемых  $T_w$ .

Расчетную реализацию соотношений (9), (10), (11), (12) осложняет необходимость использования в них численного значения  $T_v$ , очевидным образом отсутствующего в случаях, требующих фединг-коррекции. Для разрешения данного противоречия был использован рекуррентный вариант расчета, апробированный в форме шестишаговой итерационной процедуры. Реализационный алгоритм предусматривал пошаговое определение значений  $T_{wvs}$  ( $s$  – номер шага) с использованием на первом шаге ( $s = 1$ ) значения  $T_w$  в качестве начального приближения для  $T_v$  при расчете параметров  $d$  и/или  $m$  по соотношениям (9), (10), а на следующих шагах – значений  $T_{wvs}$ , полученных на шаг ранее.

Специализированный анализ результатов апробации предлагаемой шестишаговой итерационной процедуры с использованием всех значений  $T_w$ , представленных в табл. 1 и 2, показал, что достижение устойчивого уровня

определяемых дозовых значений  $D_{wvs}$  фактически имеет место с  $s = 4$ .

Предварительный анализ качества фединг-коррекции с использованием соотношений (9), (10), (11), (12) показал безусловно значимое снижение дополнительной погрешности, связанной с длительными задержками постоблучательного снятия показаний дозиметров. Однако одновременно была выявлена определенная зависимость отдельных параметров фединг-функционалов от длительности фединг-интервалов, используемых для их поиска. Очевидная целесообразность аттестационного установления формы фединг-коррекции при неочевидности выбора длительности фединг-интервала для этого побудили нас оценить качество коррекции в предлагаемых выше формах не только при их определении на фединг-интервале в 100 сут, но и при их определении на укороченном фединг-интервале в ~30 сут с последующей экстраполяцией полученных результатов на фединг-интервал в 100 сут.

Для интервала измерения поглощенных доз 50–500 Гр (вода) дозиметрами СО ПД (ДТС)-0.05/10 в качестве укороченного был выбран фединг-интервал с верхней границей 28 сут. Результаты определения функциональных зависимостей показателя степени  $d$  и логарифмического множителя  $m$  от  $T_v$  получены в следующем виде:

$$d = -0,0043 \cdot (1 + 4,28 \ln T_v) \quad (13)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9924$ ;

$$m = -0,0033 \cdot (1 + 5,11 \ln T_v) \quad (14)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9948$ .

Для интервала измерения поглощенных доз 1–10 кГр (вода) в качестве укороченного был выбран фединг-интервал с верхней границей 30–34 сут. Результаты определения

функциональных зависимостей показателя степени  $d$  и логарифмического множителя  $m$  от  $T_v$  получены в следующем виде:

$$d = -0,0307 \cdot (1 + 2,03 \ln T_v) \quad (15)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9996$ ;

$$m = -0,0258 \cdot (1 + 2,14 \ln T_v) \quad (16)$$

при достоверности аппроксимационного решения  $R^2 = 0,9998$ .

Для анализа качества фединг-коррекции с использованием предлагаемого формализма в обоих измерительных интервалах поглощенных доз и обоих фединг-интервалах конкретизации параметров фединг-функционалов (100 сут и ~30 сут) были сформированы восемь массивов так называемых невязок, определяемых в процентном формате как  $(D_{wvs} - D_v)/D_v$ , где  $D_{wvs}$  – откорректированный аналог дозы за облучение, при определении которого использовались результаты измерения  $T_w$  и рекуррентный поиск с  $s = 6$ , а  $D_v$  – доза за облучение, при определении которой использовались результаты прямого измерения  $T_v$ .

Полученные результаты в графической форме отображены на рис. 5 и 6. Каждый рисунок содержит четыре индивидуализированных фрагмента, различающихся формой фединг-функционалов и длительностью фединг-интервала, используемого для поиска соответствующей фединг-аппроксиманты. Значения невязок, отмеченные маркерами ●, находятся в границах аппроксимационных фединг-интервалов; значения невязок, отмеченных маркерами ○, находятся вне границ аппроксимационных фединг-интервалов и, по факту, иллюстрируют экстраполяционные возможности использования фединг-функционалов с укороченной аппроксимационной базой.

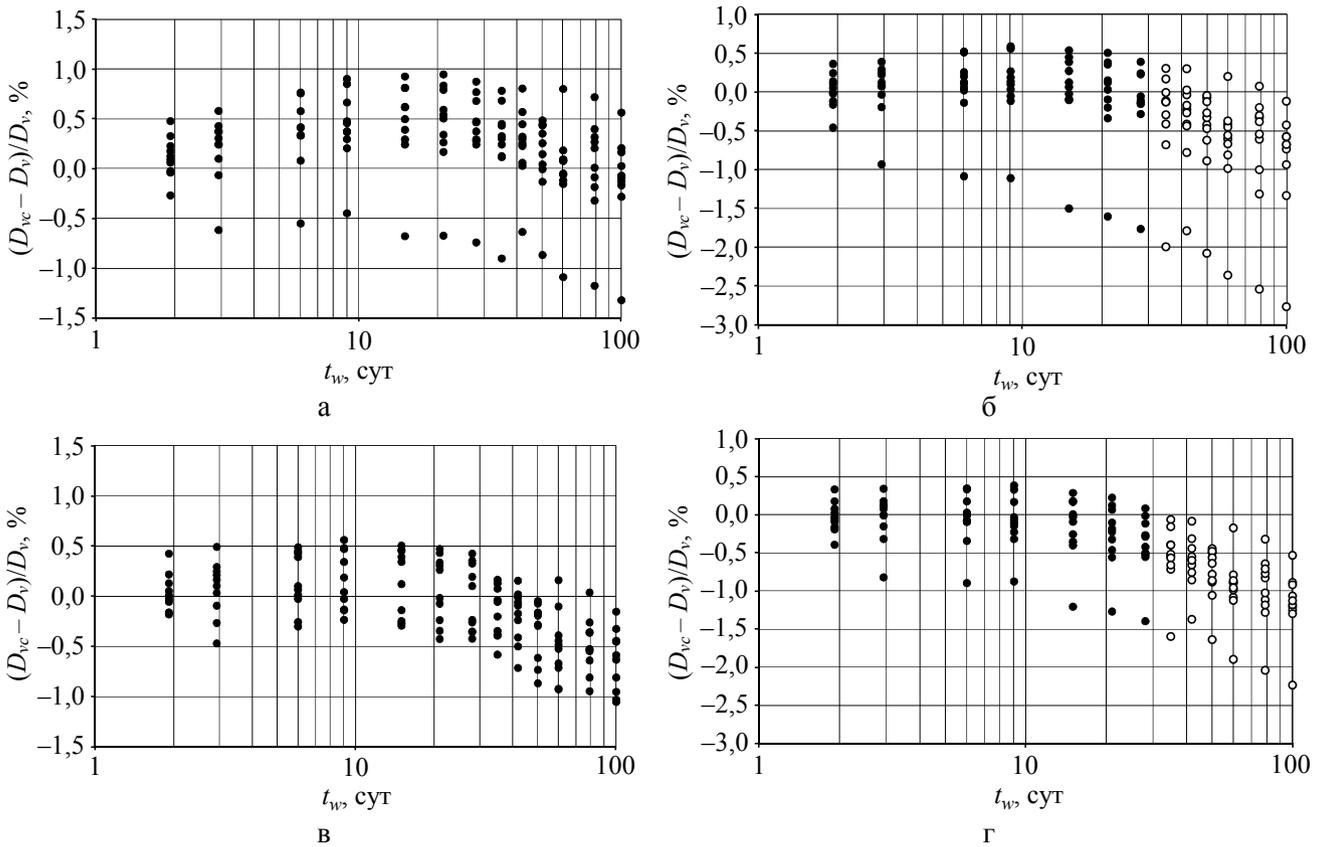


Рис. 5. Качество дозовой фединг-коррекции в измерительном интервале поглощенных доз 50–500 Гр (вода): а – степенная аппроксимация в фединг-интервале 1–100 сут; б – степенная аппроксимация в фединг-интервале 1–28 сут; в – логарифмическая аппроксимация в фединг-интервале 1–100 сут; г – логарифмическая аппроксимация в фединг-интервале 1–30 сут

Результаты, представленные на рис. 5, позволяют констатировать следующее:

- предлагаемый для использования в измерительном интервале поглощенных доз от 50 до 500 Гр (вода) формализм фединг-коррекции с базовым фединг-интервалом 1–100 сут позволяет снизить уровень дополнительной погрешности искомых дозовых величин, обусловленных фединг-эффектом дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10, до уровня, не превышающего 1,5 % как в степенном, так и в логарифмическом вариантах представления функциональной зависимости отношения  $T_v/T_w$  от  $t_w$ ;

- использование формализма фединг-коррекции с базовым фединг-интервалом 1–30 сут приводит к определенному расширению коридора дополнительной погрешности в интерполяционном фединг-интервале от 30 до 100 сут, которое для уровней дозового нагружения от ~100 Гр (вода) и более можно не принимать во внимание.

Результаты, представленные на рис. 6, позволяют констатировать следующее:

- предлагаемый для использования в измерительном интервале поглощенных доз от 1 до 10 кГр (вода) формализм фединг-коррекции с базовым фединг-интервалом 1–100 сут позволяет значительно снизить уровень дополнительной погрешности искомых дозовых величин, обусловленных фединг-эффектом дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10; как в степенном, так и в логарифмическом вариантах представления функциональной зависимости отношения  $T_v/T_w$  от  $t_w$  удается обеспечить уровень дополнительной погрешности ~2 % до  $t_w \approx 60$  сут;

- использование формализма фединг-коррекции с базовым фединг-интервалом 1–30 сут практически не приводит к расширению коридора дополнительной погрешности в экстраполяционном фединг-интервале от 30 до 100 сут.

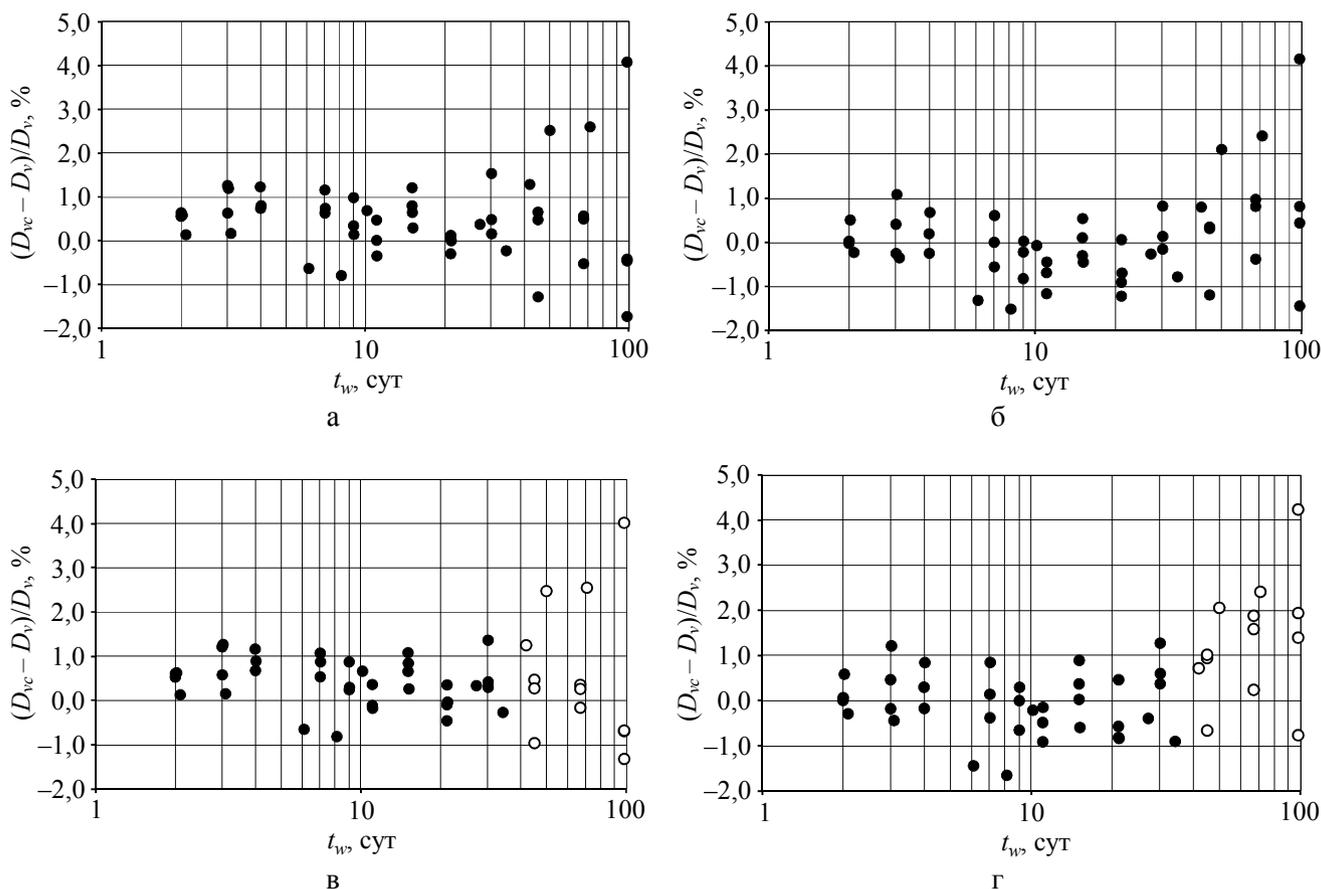


Рис. 6. Качество дозовой фединг-коррекции в измерительном интервале поглощенных доз 1–10 кГр (вода): а – степенная аппроксимация в фединг-интервале 1–100 сут; б – степенная аппроксимация в фединг-интервале 1–28 сут; в – логарифмическая аппроксимация в фединг-интервале 1–100 сут; г – логарифмическая аппроксимация в фединг-интервале 1–30 сут

## Заключение

Несмотря на определенную фрагментарность и количественную ограниченность исходных экспериментальных данных, удалось получить достаточно обобщенную картину влияния фединга на показания твердотельных стеклянных дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10 в обоих измерительных диапазонах поглощенных доз: 50–500 Гр (вода) и 1–10 кГр (вода).

Выбор функционального параметра  $T_v/T_w$  в качестве основной переменной величины из множества возможных позволил оптимизировать формализм описания и коррекции присутствующего твердотельным стеклянным дозиметрам фединга индуцированной  $\gamma$ -излучением окраски стекла.

Получены две равнозначные формы функциональной зависимости отношения  $T_v/T_w$  от постоблучательной задержки снятия показаний дозиметра  $t_w$  в интервале изменения  $t_w$  1–100 сут по окончании облучения. Выявлены и количественно конкретизированы зависимости ключевых параметров форм фединга  $T_v/T_w$  от уровня радиационной нагрузки в формате  $T_v$ . Проведена оценка влияния на ключевые параметры длительности постоблучательного фединг-интервала.

На данном этапе исследований предпочтительность применения какой-то одной из установленных форм фединга  $T_v/T_w$  значимо не аргументируется.

Предложены и апробированы восемь вариантов фединг-коррекции (по четыре для каждого

измерительного интервала дозиметров), различающиеся формой фединг-функционалов и длительностью фединг-интервалов, использованных для конкретизации ключевых параметров соответствующих фединг-функционалов. Установленное значительное снижение уровня дополнительной погрешности даже при использовании варианта ключевых параметров с укороченным фединг-интервалом их конкретизации, особенно в измерительном диапазоне поглощенной дозы 1–10 кГр (вода), позволяет говорить об очевидной целесообразности внедрения предлагаемого формализма фединг-коррекции в практику дозиметрических измерений в полях радиационного нагружения с применением дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10.

В качестве значимой структурной составляющей системы мероприятий по практическому освоению предлагаемых форм учета и коррекции фединг-эффекта твердотельных стеклянных дозиметров предлагается рассматривать обязательность включения в аттестуемые характеристики метрологических комплектов дозиметров СО ПД (ДТС)-0.05/10 фединг-функционалов для  $T_v/T_w$ , формализованных в постоблучательном интервале не короче 30 сут.

## Список литературы

1. Франк М., Штольц В. Твердотельная дозиметрия ионизирующего излучения: Пер. с нем. / Под ред. И. Б. Кеирим-Маркуса. – М.: Атомиздат, 1973, 248 с.
2. Брикман Б. А., Генералова В. В., Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 200 с.
3. Кошелев А. С., Маслов Г. Н., Одинцов Ю. М., Тарасова Е. Ю. Характеристики стационарного поля нейтронного и гамма-излучений во внутризонной облучательной полости реактора БР-К1 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 1997, вып. 2, с. 3–13.
4. Завьялов Н. В., Тельнов А. В., Хохлов Ю. А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Ядерно-физические исследования, 1997, вып. 2, 3 (29, 30), т. 1, с. 39–41.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,  
ведущий научный сотрудник ИЯРФ,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 175–189.