

Глава 9. ОСЛАБЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ СТЕКЛАМИ. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ИОНИЗУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Материал, изложенный в главах 5 и 6, убедительно показывает, что при одной и той же экспозиционной дозе γ -облучения радиационно-оптическая устойчивость варьируется в очень широких пределах при переходе от стекол одного типа к другому. Так, можно уверенно говорить о том, что легкие кроны в гораздо меньшей степени окрашиваются ионизирующим излучением, чем, скажем, тяжелые флинты. Промежуток между этими крайними с точки зрения эффективности радиационного окрашивания типами стекол заполнен стеклами других типов. При этом, однако, наблюдается вполне определенная закономерность: по мере увеличения плотности стекол падает их радиационно-оптическая устойчивость. Плотность же стекол определяется номенклатурой и относительными концентрациями химических элементов, входящих в их состав. Более тяжелые химические элементы, как оказывается, сильнее ослабляют рентгеновское и γ -излучение, чем элементы с меньшей атомной массой. Это значит, что при одной и той же экспозиционной дозе облучения более плотные стекла в среднем поглощают больше энергии падающего на них ионизирующего излучения, чем менее плотные стекла. Соответственно, в первых может генерироваться гораздо больше носителей зарядов, а следовательно, больше образовываться центров окраски, чем в последних. Понятно, что для корректного сопоставления стекол разных типов по эффективности образования радиационных центров окраски под действием фотонного излучения с разными энергиями квантов нужно знать их линейные коэффициенты ослабления излучения. Порядок их расчета, проведенного автором данного пособия для нескольких десятков оптических и радиационно-стойких стекол, а также результаты таких расчетов описываются в данной главе. Далее, для некоторых специальных применений оптических материалов в условиях воздействия на них мощных потоков рентгеновского или γ -излучения (смотровые окна «горячих» или изотопных камер, облучательных установок технического и медицинского назначения, машин радиационной разведки), кроме их высокого визуального пропускания и высокой радиационно-оптической устойчивости, важную роль играют так называемые защитные свойства. В данном случае речь идет о способности окна, выполненного из того или иного оптического материала, защитить операторов названных устройств от вредного действия ионизирующего излучения и одновременно дать им возможность вести наблюдения за объектами в поле ионизирующего излучения. Понятно, что защитная способность тем выше, чем больше коэффициент ослабления излучения слоем материала. Как правило, более эффективно роль защитных

материалов играют свинецсодержащие стекла флинтовой группы. Как изменяются их защитные свойства, а также спектры их пропускания и радиационно-оптическая устойчивость при переходе от одного стекла к другому, каковы тенденции в разработке защитных материалов нового поколения, читатель поймет при ознакомлении с материалом данной главы.

9.1. Методика расчета коэффициента ослабления рентгеновского и гамма-излучения оптическими стеклами

Расчет натуральных линейных коэффициентов, μ , ослабления ионизирующего излучения стеклами разных составов производился для диапазона энергий квантов от 20 кэВ до 3 МэВ. В этот диапазон попадает и рентгеновское излучение разной природы, и γ -излучение наиболее распространенных радионуклидных источников. Для проведения расчетов требуется знать для каждого стекла его плотность, ρ , и массовые доли, α_i , атомов каждого типа, входящих в состав стекла. Заметим, что в составе оксидных стекол (а ими являются все оптические стекла) преобладающими являются массовые доли кислорода в стеклах кроновой группы и свинца в стеклах флинтовой группы, особенно в случае стекол типа ТФ. Приведем для подтверждения этого утверждения значения массовых долей элементов, входящих в состав стекол К8 и ТФ10 как представителей кроновой и флинтковой групп, соответственно (табл.9.1).

Значения μ для разных энергий квантов излучения, E_k , определялись по формуле

$$\mu(E_k) = \sum \rho * [\alpha_i * (\mu_i(E_k) / \rho_i(E_k))]. \quad (9.1)$$

Суммирование в (9.1) велось по всем типам атомов в составе стекла. Как следует из табл. 9.1, основной вклад в значение μ в случае стекла К8 вносят кислород, кремний и щелочные элементы, а в случае стекла ТФ10 – свинец, кислород и кремний. В составе стекол типа БК, ТК и СТК велика массовая доля бария, а в составе стекла СТК119 – лантана и бора. Поэтому понятно, что в каждом конкретном случае те или иные 3 – 4 химических элемента из состава стекла будут определять его суммарные значения коэффициентов ослабления фотонного излучения, тогда как остальные элементы будут лишь незначительно изменять их величину.

Таблица 9.1. Массовые доли атомов в оптических стеклах.

Элемент в стекле	Si	B	Sb	As	Ba	Pb	K	Na	O
К8	0.323	0.033	–	0.003	0.028	–	0.052	0.077	0.485
ТФ10	0.127	–	0.003	0.002	–	0.656	0.008	0.004	0.201

Данные по полным массовым коэффициентам ослабления фотонного излучения без учета когерентного рассеяния квантов ($\mu_i(E_k) / \rho_i(E_k)$) брались из литературы, где они приведены для всех элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Укажем их значения для тех элементов, которые наиболее часто используются в оптическом стекловарении и которые вносят основной вклад в значение μ оптических стекол в интересующем нас диапазоне энергий от 20 кэВ до 3 МэВ (табл. 9.2). Погрешность их определения для всех элементов, кроме бария, лантана, церия и свинца, в области энергий до 0.2 МэВ равна 10 %, а при $E > 0.2$ МэВ – 5 %. Для бария, лантана и церия эта погрешность составляет 25 % в области энергий до 0.04 МэВ, а при больших энергиях – 5 %, как у всех остальных элементов. Наконец, спектральная зависимость погрешности определения μ для свинца выглядит следующим образом: 25% в диапазоне энергий квантов от 0.02 до 0.088 МэВ, 10 % - от 0.088 до 0.2 МэВ и 5 % - при $E > 0.2$ МэВ.

Таблица 9.2. Массовые коэффициенты ослабления (μ/ρ , см²/г) фотонного излучения химическими элементами.

E , МэВ	₅ V	₈ O	₁₁ Na	₁₃ Al	₁₄ Si	₁₅ P	₁₉ K	₂₀ Ca
0.02	0.238	0.715	1.85	3.19	4.18	5.03	10.6	12.7
0.03	0.177	0.308	0.605	0.973	1.25	1.49	3.14	3.82
0.04	0.162	0.218	0.330	0.473	0.592	0.684	1.36	1.65
0.05	0.156	0.187	0.237	0.308	0.367	0.412	0.753	0.896
0.06	0.151	0.173	0.196	0.237	0.272	0.295	0.487	0.574
0.08	0.143	0.158	0.163	0.179	0.196	0.202	0.283	0.319
0.10	0.136	0.149	0.148	0.156	0.167	0.168	0.208	0.225
0.15	0.123	0.133	0.129	0.131	0.137	0.135	0.147	0.155
0.20	0.113	0.122	0.117	0.119	0.123	0.121	0.125	0.130
0.30	0.0980	0.106	0.102	0.102	0.106	0.103	0.105	0.108
0.40	0.0880	0.0952	0.0909	0.0917	0.0950	0.0923	0.0930	0.0950
0.50	0.0802	0.0869	0.0831	0.0839	0.0868	0.0842	0.0847	0.0873
0.60	0.0747	0.0805	0.0770	0.0775	0.0802	0.078	0.0784	0.0806
0.80	0.0652	0.0708	0.0676	0.0681	0.0703	0.0684	0.0687	0.0706
1.0	0.0591	0.0636	0.0608	0.0612	0.0632	0.0614	0.0619	0.0636
1.5	0.0479	0.0516	0.0498	0.0500	0.0517	0.0502	0.0505	0.0519
2.0	0.0410	0.0444	0.0427	0.0431	0.0446	0.0434	0.0439	0.0451
3.0	0.0328	0.0359	0.0348	0.0355	0.0367	0.0358	0.0365	0.0376

Продолжение таблицы 9.2.

E , МэВ	$_{30}\text{Zn}$	$_{33}\text{As}$	$_{40}\text{Zr}$	$_{51}\text{Sb}$	$_{56}\text{Ba}$	$_{57}\text{La}$	$_{58}\text{Ce}$	$_{82}\text{Pb}$
0.02	35.8	44.1	72.6	21.3	27.8	29.50	31.3	83.10
0.03	11.5	14.3	24.0	6.78	4.87	9.63	10.2	28.60
0.04	5.13	6.47	10.9	19.6	24.20	25.60	4.60	13.30
0.05	2.73	3.49	5.93	10.8	13.30	14.00	14.7	7.30
0.06	1.63	2.09	3.58	6.58	8.20	8.63	9.07	4.48
0.08	0.766	0.948	1.64	3.03	3.79	3.98	4.21	2.07
0.10	0.451	0.555	0.911	1.65	2.08	2.19	2.31	5.32
0.15	0.214	0.241	0.353	0.599	0.737	0.776	0.817	1.90
0.20	0.150	0.158	0.208	0.317	0.381	0.399	0.419	0.993
0.30	0.109	0.109	0.123	0.157	0.177	0.183	0.190	0.369
0.40	0.0921	0.0900	0.0970	0.111	0.120	0.124	0.127	0.215
0.50	0.0825	0.0803	0.0845	0.0905	0.0947	0.0967	0.00993	0.150
0.60	0.0755	0.0732	0.0753	0.0787	0.0807	0.0824	0.0842	0.117
0.80	0.0658	0.0635	0.0645	0.0648	0.0653	0.0663	0.0670	0.0840
1.0	0.0589	0.0567	0.0572	0.0569	0.0566	0.0572	0.0580	0.0680
1.5	0.0480	0.0462	0.0465	0.0457	0.0452	0.0460	0.0464	0.0508
2.0	0.0422	0.0407	0.0412	0.0406	0.0403	0.0407	0.0412	0.0451
3.0	0.0361	0.0352	0.0362	0.0365	0.0365	0.0369	0.0375	0.0416

Из таблицы 9.2 следует, что с ростом атомного номера химического элемента (левый нижний индекс у его символа в таблице) возрастают значения массовых коэффициентов ослабления фотонного излучения практически во всем указанном выше диапазоне энергий квантов. Наиболее сильные отличия в значениях массовых коэффициентов ослабления фотонного излучения химическими элементами отмечаются в низкоэнергетической части указанного диапазона энергий, т. е. для рентгеновского излучения. Именно в этой области энергий у некоторых из приведенных в табл. 9.2 элементов (свинец, лантан и барий) обнаруживаются L_1 - и K -линии характеристического рентгеновского

излучения, которым отвечают максимумы значений массовых коэффициентов ослабления излучения. Так, например, у свинца максимум L_1 -линии находится при 0.00158 МэВ, т. е. уже вне интересующего нас диапазона энергий, а К-линии – при 0.088 МэВ. У бария и лантана максимум К-линии приходится на 0.0374 и 0.0389 МэВ, соответственно, а энергия максимума L_1 -линии уже заметно меньше 0.02 МэВ.

Таким образом, знание плотности стекол, массовых долей входящих в состав стекол химических элементов и их значений массовых коэффициентов ослабления позволило рассчитать энергетические зависимости линейных коэффициентов ослабления фотонного излучения оптическими и радиационно-стойкими стеклами.

9.2. Характеристика ослабления рентгеновского и γ -излучения оптическими и радиационно-стойкими стеклами

Объем пособия не позволяет привести данные по линейным коэффициентам ослабления рентгеновского и γ -излучения для всех стекол, поэтому, как и в предыдущих главах, ограничимся лишь типовыми стеклами (табл. 9.3).

Таблица 9.3. Линейные коэффициенты ослабления (см^{-1}) фотонного излучения оптическими стеклами.

E , МэВ	SiO ₂	ЛК7	К8	БК6	ТК20	СТК19	КФ4
0.02	5.161	6.4921	8.2772	25.024	48.698	83.056	19.333
0.03	1.651	2.0670	2.3741	5.9855	9.9269	27.311	6.5252
0.04	0.986	1.0491	2.7263	13.691	35.900	39.566	3.1404
0.05	0.599	0.6984	1.6309	7.6286	19.939	21.835	1.8567
0.06	0.485	0.5463	1.1300	4.8077	12.392	13.523	1.2649
0.08	0.388	0.4210	0.7024	2.3869	5.8794	6.9582	0.7622
0.10	0.348	0.3697	0.5332	1.4485	3.3528	3.9326	1.2404
0.15	0.298	0.3116	0.3812	0.6957	1.3546	1.5959	0.6311
0.20	0.271	0.2815	0.3253	0.4831	0.8157	0.9479	0.4540
0.30	0.234	0.2430	0.2705	0.3380	0.4808	0.5552	0.2947
0.40	0.210	0.2178	0.2397	0.2830	0.3751	0.4314	0.2504
0.50	0.192	0.1988	0.2178	0.2508	0.3210	0.3673	0.2231
0.60	0.178	0.1840	0.2011	0.2286	0.2870	0.3285	0.2037
0.80	0.156	0.1614	0.1762	0.1979	0.2435	0.2786	0.1764
1.0	0.140	0.1450	0.1583	0.1768	0.2155	0.2467	0.1575
1.5	0.114	0.1181	0.1288	0.1435	0.1743	0.1996	0.1278
2.0	0.0983	0.1018	0.1111	0.1245	0.1521	0.1739	0.1102
3.0	0.0802	0.0837	0.0908	0.1036	0.1320	0.1479	0.0916

Продолжение табл. 9.3.

E , МэВ	БФ21	ЛФ5	Ф4	ТФ3	ОФ1	ТКН3	ТФ200
0.02	109.85	99.330	142.33	215.90	13.704	69.446	155.42
0.03	36.400	33.876	48.798	74.144	4.4046	15.777	53.282
0.04	22.108	16.294	22.759	34.702	8.8347	43.342	24.837
0.05	12.227	9.0501	12.596	19.149	5.1147	24.278	14.115
0.06	7.6052	5.6595	7.8321	11.849	3.2330	15.044	8.7655
0.08	3.6653	2.7675	3.7668	5.6155	1.6489	7.0946	4.1978
0.10	6.6603	6.2641	9.0238	13.770	1.0293	4.3118	9.8872
0.15	2.5473	2.4010	3.3816	5.0682	0.5389	1.6932	3.6883
0.20	1.4440	1.3632	1.8723	2.7482	0.3937	0.9915	2.0314
0.30	0.5532	0.5060	0.6290	0.8445	0.2911	0.5474	0.6706
0.40	0.3939	0.3590	0.4252	0.5424	0.2485	0.4180	0.4484
0.50	0.3185	0.2893	0.3317	0.4078	0.2223	0.3537	0.3473
0.60	0.2745	0.2486	0.2790	0.3341	0.2037	0.3142	0.2906
0.80	0.2245	0.2028	0.2222	0.2581	0.1767	0.2653	0.2301
1.0	0.1952	0.1760	0.1905	0.2178	0.1582	0.2343	0.1967
1.5	0.1555	0.1400	0.1503	0.1968	0.1285	0.1891	0.1548
2.0	0.1354	0.1216	0.1308	0.1482	0.1111	0.1655	0.1349
3.0	0.1156	0.1034	0.1127	0.1302	0.0934	0.1428	0.1167

К сожалению, линейные коэффициенты ослабления были рассчитаны автором пособия не для всех марок стекол, поэтому нам придется заменить некоторые марки стекол, которые мы уже описывали в предыдущих главах, другими марками стекол того же типа, чтобы у читателя сформировалось представление об ослаблении фотонного излучения всеми типами стекол. Отметим при этом, что в парах или триадах аналогов оптических и радиационно-стойких стекол энергетические зависимости μ с высокой точностью совпадают друг с другом.

Анализ данных таблицы 9.3 позволяет сделать несколько выводов. Во-первых, более тяжелые стекла характеризуются более высокими значениями μ для любой энергии квантов во всем диапазоне от 0.02 до 3.0 МэВ. Поэтому, например, при переходе от легких кронов к кронам, от тяжелых кронов к сверхтяжелым, от легких флинтгов к флинтам и тяжелым флинтам наблюдается повышение линейных коэффициентов ослабления излучения. А это означает, что более тяжелые стекла поглощают больше энергии первичного фотонного излучения, чем более легкие стекла. Во-вторых, для всех типов стекол значения μ для рентгеновского излучения многократно выше таковых для γ -излучения. В-третьих, у значительной части стекол спектральный ход зависимости $\mu(E)$ в области энергий

квантов от 0.02 до 0.1 МэВ не является монотонным из-за проявления линий характеристического поглощения фотонного излучения.

Как известно, ослабление фотонного излучения слоем материала толщиной l и линейным коэффициентом ослабления μ описывается экспоненциальным законом:

$$Q_e = Q_0 * e^{-\mu l}, \quad (9.2)$$

где Q_0 и Q_e – экспозиционные дозы перед слоем материала и на его выходе, соответственно. Как показывает опыт, такой формулой можно пользоваться при определении толщины стекла, ослабляющей излучение заданной энергии квантов в определенное число раз. В нормативных документах чаще всего указываются толщины половинного ($L_{0.5}$) и десятикратного ($L_{0.1}$) ослабления излучения. В таблице 9.4 эти значения, рассчитанные автором, приведены для ослабления γ -излучения ^{137}Cs (0.663 МэВ) и ^{60}Co (1.25 МэВ) стеклами разных типов. Как следует из этой таблицы, одно и то же стекло ослабляет γ -излучение ^{137}Cs сильнее, чем аналогичное излучение ^{60}Co . При этом самыми малыми значениями $L_{0.5}$ и $L_{0.1}$, т. е. наибольшей ослабляющей способностью характеризуется стекло ТФ10 с максимальной плотностью, в составе которого 40 мол. % PbO . Кварцевое стекло как стекло с наименьшей из всех представленных в таблице 9.4 стекол плотностью отличается максимальными значениями толщин половинного и десятикратного ослабления, т. е. наименьшей ослабляющей способностью. Далее, в табл. 9.4 представлены данные для стекол-аналогов К8 и К208 как крайних элементов триады К8 – К108 – К208. Следует сказать, что стекло К108 имеет точно такие же характеристики, что и названные К8 и К208. Чтобы не занимать места в таблице, для всех других типов стекол приведены данные по линейным коэффициентам ослабления излучения и по толщинам $L_{0.5}$ и $L_{0.1}$ только для стекол основного каталога, однако нужно помнить, что их радиационно-стойкие аналоги имеют те же самые характеристики по ослаблению излучения.

Данные по коэффициентам линейного ослабления фотонного излучения оптическими и радиационно-стойкими стеклами полезны не только при расчете толщин многократного ослабления ими рентгеновского и γ -излучения, но и при оценке доли экспозиционной дозы, затраченной в стекле на образование радиационных центров окраски. Формула 9.2 справедлива при этом только для случая тонкого слоя ($\mu l \ll 1$) ослабляющего излучение материала, когда Комптоновским рассеянием квантов можно пренебречь. Так, например, для слоев толщиной в 1 см кварцевого стекла (SiO_2), а также стекол ЛК7, К8, КФ4 и ОФ1 значение μl не превосходит 0.1, что допускает использование формулы 9.2. Тогда разница между Q_0 и $Q_0 * e^{-\mu l}$ как раз и даст ту часть дозы, которая ответственна за образование центров окраски в облученном стекле.

Таблица 9.4. Количественные характеристики ослабления γ -излучения радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co оптическими стеклами.

Параметр	SiO ₂	ЛК7	К8	К208	БК6	ТК2	ТК21
^{137}Cs (0.663 МэВ)							
μ , см ⁻¹	0.1700	0.1765	0.2122	0.2122	0.2251	0.2437	0.3008
L _{0.5} , см	4.08	3.93	3.27	3.27	3.08	2.84	2.30
L _{0.1} , см	13.54	13.05	10.85	10.85	10.23	9.45	7.65
^{60}Co (1.25 МэВ)							
μ , см ⁻¹	0.1270	0.1315	0.1435	0.1435	0.1602	0.1770	0.2134
L _{0.5} , см	5.46	5.27	4.83	4.83	4.33	3.92	3.25
L _{0.1} , см	18.66	17.51	16.05	16.05	14.37	13.01	10.79

Параметр	СТК3	СТК19	КФ4	БФ21	ЛФ11	ЛФ5	Ф1
^{137}Cs (0.663 МэВ)							
μ , см ⁻¹	0.2980	0.3119	0.1946	0.2578	0.2215	0.2234	0.2540
L _{0.5} , см	2.36	2.22	3.56	2.69	3.13	2.97	2.73
L _{0.1} , см	7.73	7.38	11.83	8.93	10.40	9.86	9.07
^{60}Co (1.25 МэВ)							
μ , см ⁻¹	0.2111	0.2692	0.1426	0.1753	0.1540	0.1580	0.1674
L _{0.5} , см	3.29	2.57	4.86	3.95	4.50	4.39	4.14
L _{0.1} , см	10.90	8.55	16.15	13.14	14.95	14.57	13.75

Параметр	Ф4	ТФ3	ТФ5	ТФ10	ОФ1	ТКН3	ТФ200
^{137}Cs (0.663 МэВ)							
μ , см ⁻¹	0.2600	0.3088	0.3274	0.3531	0.1947	0.2979	0.2704
L _{0.5} , см	2.67	2.24	2.12	1.96	3.56	2.33	2.56
L _{0.1} , см	8.57	7.46	7.03	6.52	11.86	7.73	8.52
^{60}Co (1.25 МэВ)							
μ , см ⁻¹	0.1704	0.1938	0.2019	0.2141	0.1433	0.2117	0.1757
L _{0.5} , см	4.07	3.58	3.43	3.24	4.84	3.27	3.95
L _{0.1} , см	13.51	11.88	11.40	10.75	16.07	10.88	13.11

Если же соотношение $\mu l \ll 1$ не выполняется, что имеет место в случае толстого слоя ослабляющего излучение материала (например, при увеличении толщины названных стекол, скажем, до 10 см), то ослабление дозы облучения рассчитывается по другой формуле:

$$Q_6 = Q_0 * e^{-\mu_3 l}, \quad (9.3)$$

где μ_3 – так называемый эквивалентный коэффициент ослабления излучения. Его значение связано с μ следующим соотношением:

$$\mu_3 l = \mu l - \ln B, \quad (9.4)$$

где B – фактор дозового накопления, зависящий от плотности ослабляющего излучение материала, энергии квантов падающего на него излучения и числа длин свободного пробега излучения (μl) в толще материала (рис. 9.1 и 9.2). Как видно из этих рисунков, для материалов с малой плотностью значения дозового фактора накопления слабо зависят от энергии квантов, тогда как в материалах с большой плотностью его значения для квантов с большей энергией (рис. 9.1) заметно выше, чем для квантов излучения с меньшей энергией (рис. 9.2).

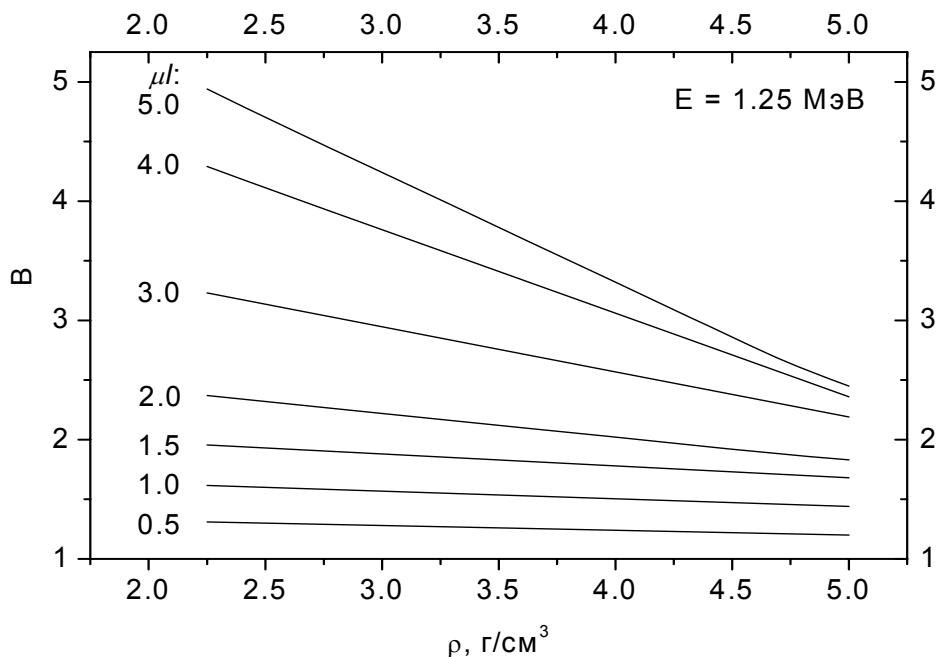


Рис. 9.1. Зависимость дозового фактора накопления излучения с энергией квантов 1.25 МэВ от плотности стекла при разных значениях длин свободного пробега квантов излучения в материале.

Необходимость введения понятия дозового фактора накопления и его учета при анализе последствий облучения оптических материалов рентгеновским и γ -излучением связана с тем, что не все кванты фотонного излучения, избежавшие поглощения пройденным слоем материала, сохраняют первоначальное направление своего распространения при прохождении через последующие слои материала, часть из них рассеивается – как упруго, так и неупруго, – способствуя накоплению дозы в материале и увеличению числа образуемых радиационных центров окраски. Отметим при этом, что, как следует из рис. 9.1 и 9.2, в оптических материалах с большой плотностью (правые части рисунков) накопление дозы высокоэнергетического излучения (1.25 МэВ) выражено более сильно, чем излучения с меньшей энергией квантов (0.5 МэВ).

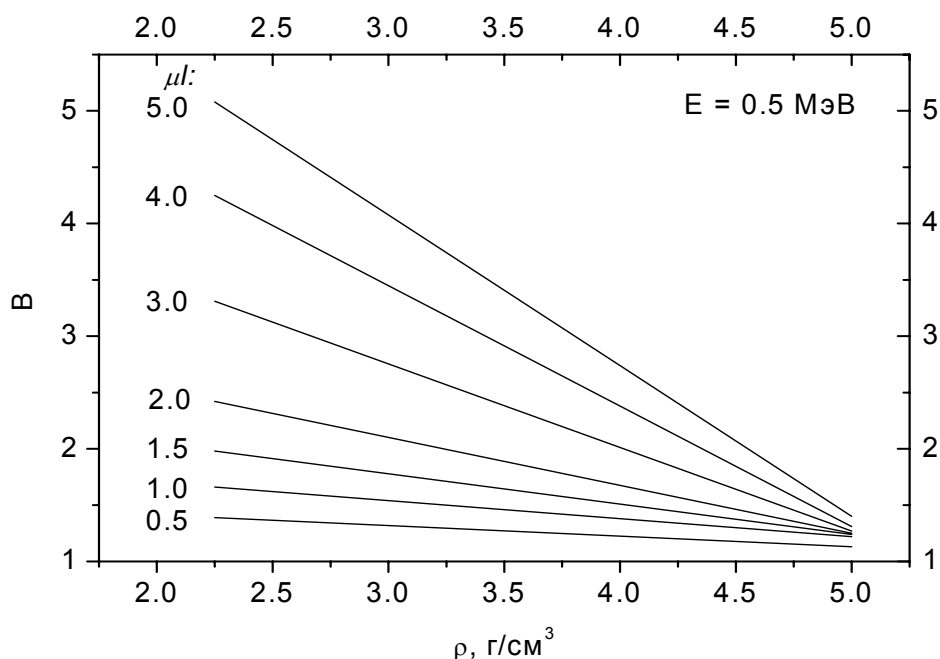


Рис. 9.2. Зависимость дозового фактора накопления излучения с энергией квантов 0.5 МэВ от плотности стекла при разных значениях длин свободного пробега квантов излучения в материале.

9.3. Требования к оптическим стеклам для защиты человека от ионизирующего излучения

Поскольку смотровые защитные окна должны функционировать в условиях очень высоких радиационных нагрузок, главным требованием, которое предъявляется к окнам «горячих» и изотопных камер, машин радиационной разведки, является требование обеспечения достаточно больших кратностей ослабления излучения. Например, в случае аварий на атомных станциях экспозиционные дозы могут быть столь высокими, что требуемая кратность ослабления может достигать значений порядка 10^3 – 10^6 раз. Ясно, что для выполнения этого требования нужно и увеличивать толщину смотрового окна, и брать для его изготовления стекло с максимально возможным значением линейного коэффициента ослабления излучения. Как мы видели, флинтовые многосвинцовые стекла превосходят все другие типы стекол по этому параметру. Однако даже в случае использования таких стекол толщина смотровых окон может достигать десятков сантиметров. Это обстоятельство сразу обуславливает выдвигание достаточно жесткого требования максимально высокой пропускающей способности стекла в видимой области спектра. В противном случае сквозь большой слой защитного стекла трудно будет что-либо рассмотреть. Кроме того, желательно, чтобы граница пропускания стекла лежала в УФ области спектра, иначе смотровое окно

большой толщины практически не будет пропускать свет в фиолетово-синей части видимой области спектра. Далее, радиационно-оптическая устойчивость защитных стекол должна быть достаточно высокой, чтобы радиационные центры окраски не лишили операторов специальных устройств возможности получать оптическую информацию об объектах наблюдения в мощном радиационном поле. Отметим, что для снижения нагрузки на глаза оператора, повышения комфортности наблюдения через смотровое окно, обеспечения возможности получения оптической информации во всей видимой области желательно для изготовления смотровых окон использовать исходно бесцветные стекла, которые бы одновременно слабо окрашивались под действием рентгеновского или γ -излучения. Наконец, следует учитывать, что при большой толщине смотровых окон их масса может быть также большой, что может стать ограничением, если смотровые окна устанавливаются на каких-то носителях. Понятно, в этом случае более предпочтительным будет защитный материал с меньшей плотностью.

Понятно, что реальность не всегда совпадает с желаниями, тем не менее требования к защитным материалам, сколь бы жесткими они ни были, должны быть сформулированы, поскольку только в этом случае есть к чему стремиться при выборе материала для смотрового окна того или иного устройства специального назначения или при разработке защитных материалов нового поколения. Именно эти требования позволили группе ученых НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова» под руководством автора пособия разработать новые защитные стекла с повышенными функциональными свойствами.

9.4. Радиационно-стойкие защитные стекла нового поколения

Существующие тяжелые силикатные флинты, а также их радиационно-стойкие аналоги (стекла серий 100 и 200) характеризуются, как мы видели, недостаточно высокой радиационно-оптической устойчивостью, а также наличием желтизны, вызванной пониженным светопропусканием в фиолетово-синей и ближней УФ областях спектра. Это ограничивает возможности их использования для изготовления защитных смотровых окон современных «горячих» и изотопных камер, облучательных установок технического и медицинского назначения и машин радиационно-химической разведки. По этой причине требовалось найти составы новых стекол, прозрачных в более широком спектральном диапазоне, включающем ближнюю УФ область спектра, и обладающих радиационно-оптической устойчивостью и защитными свойствами, превосходящими таковые существующих тяжелых силикатных флинтов.

Из литературы известно, что граница фундаментального поглощения фосфатных стекол сильно сдвинута в коротковолновую сторону по сравнению с таковой у стекол других основ. В ту же сторону при переходе

к фосфатным стеклам смещаются и полосы поглощения свинца, придающего стеклу оптические свойства флинта, а также церия, ответственного за повышенную радиационно-оптическую устойчивость стекла. По этим причинам поиск перспективных составов защитных радиационно-стойких флинтových стекол с повышенной прозрачностью в ближней УФ и в фиолетово-синей областях спектра представлялось целесообразным вести в области многосвинцовых стекол фосфатной системы. Разумеется, кроме обеспечения высокой прозрачности в синей и ближней УФ областях спектра, высокой радиационно-оптической устойчивости и больших коэффициентов ослабления γ -излучения, найденный состав стекла должен был характеризоваться низкой склонностью к кристаллизации при остывании выработанного в формы расплава стекла. Необходимость оптимизации состава нового стекла по всем этим параметрам привела к тому, что в лабораторных условиях были синтезированы многосвинцовые фосфатные стекла более чем 150 составов, исследованы их спектральные, оптические, физико-химические, радиационно-оптические и защитные свойства. По полученным данным было выбрано стекло с оптимальным соотношением параметров (мол. %) $49.6 \text{ P}_2\text{O}_5 * 40.0 \text{ PbO} * 4.5 \text{ Al}_2\text{O}_3 * 3.0 \text{ K}_2\text{O} * 2.0 \text{ ZnO} * 0.5 \text{ Nb}_2\text{O}_5 * 0.2 \text{ Sb}_2\text{O}_3 * 0.2 \text{ CeO}_2$ (далее будет обозначаться как стекло 112 состава), которое было опробовано на опытном производстве НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова». Ознакомимся с его спектральными, радиационно-оптическими и защитными свойствами более детально.

На рис. 9.3 представлены спектры поглощения стекла 112 состава (кривая 1) и того же стекла без добавок оксида церия (кривая 2). Кривая 3, полученная вычитанием кривой 2 из кривой 1, демонстрирует спектр, по форме типичный для поглощения ионов Ce^{3+} – протекторной добавки, снижающей эффективность радиационного окрашивания стекла в видимой области спектра дырочными центрами матрицы. Максимум полосы поглощения ионов Ce^{3+} в свинцовофосфатном стекле находится при $E = 4.2$ эВ (295 нм), т. е. смещен в высокоэнергетическую (коротковолновую) сторону примерно на 0.25 эВ (18 нм) по сравнению с таковой в свинцовосиликатных стеклах. Из представленных на рис. 9.3 спектров нетрудно видеть, что даже стекло с церием (кривая 1) характеризуется сравнительно малым светопоглощением и, следовательно, высокой пропускающей способностью в области энергий, превышающих 3.6 – 3.7 эВ ($\lambda > 340 - 350$ нм). Последнее утверждение более наглядно демонстрирует рис. 9.4, на котором приведены спектры пропускания фосфатного стекла 112 состава с церием (кривая 1) и промышленных многосвинцовых радиационно-стойких силикатных стекол ТФ103 (кривая 2), ТФ105 (кривая 3) и ТФ110 (кривая 4), которые имеют в своем составе по 30.76, 35.02 и 40.05 мол. % PbO , соответственно, табл. 9.5).

Как следует из рис. 9.4, граница пропускания у стекла 112 состава сдвинута в коротковолновую сторону примерно на 80 нм даже по сравнению с таковой у силикатного стекла ТФ103, которое содержит почти на 10 мол. % меньше оксида свинца, чем фосфатное стекло 112 состава. Эта разница возрастает до 115 нм, если сравнить стекло 112 состава со стеклом ТФ110, имеющим практически то же количество оксида свинца (табл. 9.5).

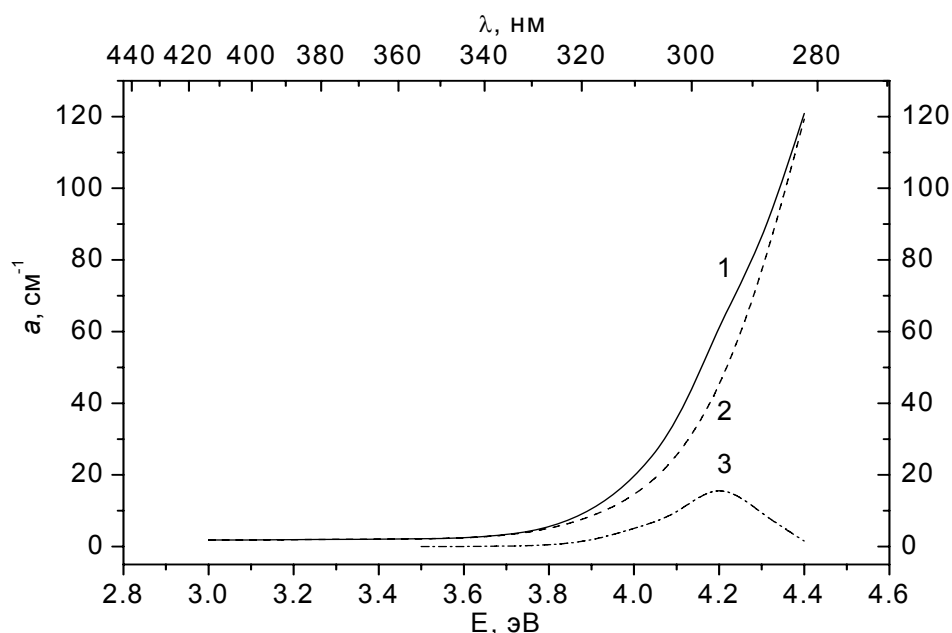


Рис. 9.3. Спектры поглощения стекла 112 состава с церием (1) и без (2) церия. Кривая 3 – разность спектров 1 и 2.

Таблица 9.5. Оптические, физические и химические свойства многосвинцовых стекол.

Стекло	112	ТФ103	ТФ105	ТФ110
n_e	1.6965	1.7232	1.7617	1.8138
$R, \%$	6.67	7.05	7.60	8.36
[PbO], мол. %	40.00	30.76	35.02	40.05
$\rho, \text{г/см}^3$	4.31	4.46	4.77	5.19

Сопоставление данных табл. 9.5 приводит к выводу о том, что традиционные многосвинцовые радиационно-стойкие силикатные стекла уступают фосфатному стеклу 112 состава по ряду функционально важных свойств. В самом деле, это стекло характеризуется минимальным значением коэффициента Френелевского отражения, т. е. минимальными Френелевскими потерями света на границе «стекло – воздух». Далее,

меньшая, чем у других стекол из табл. 9.5, плотность стекла 112 состава означает меньшую массу защитного окна даже при одной и той же толщине. Если же учесть, что для обеспечения одинаковых защитных свойств стекла ТФ103, ТФ105 и ТФ110 должны быть большей толщины, чем стекло 112 состава, то разница в массе окна возрастет еще больше.

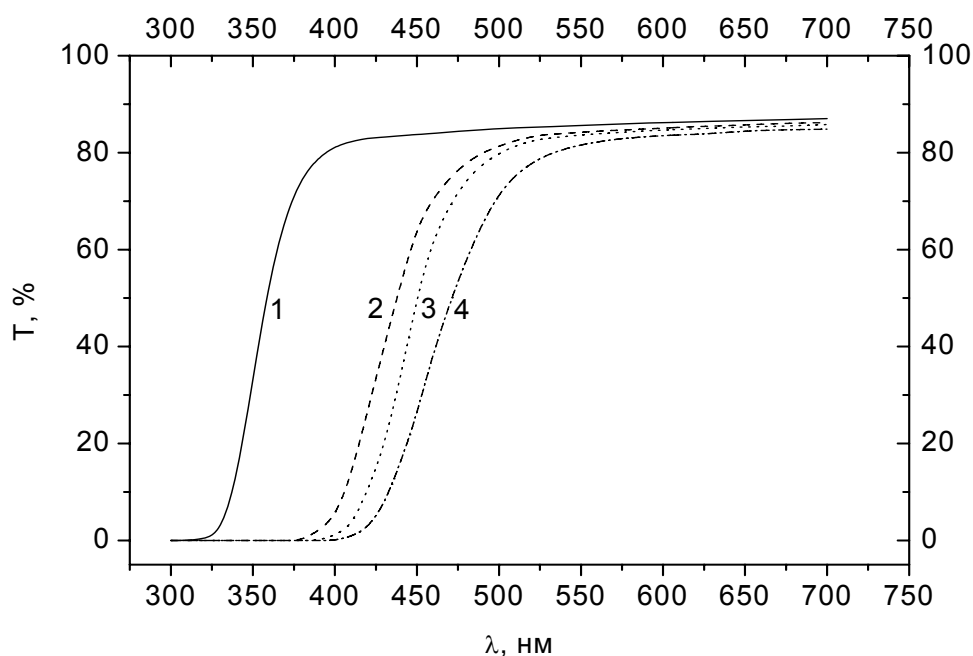


Рис. 9.4. Спектры пропускания многосвинцовых стекол: фосфатного стекла 112 состава (1) и тяжелых силикатных флинтов ТФ103 (2), ТФ105 (3) и ТФ110 (4).

Рис. 9.5 демонстрирует спектры наведенного радиацией поглощения стекол 112 состава с добавками церия (кривая 1) и без них (кривая 2). Из этого рисунка хорошо видно, что стекло с церием обладает существенно более низким наведенным поглощением в видимой области спектра, чем стекло без церия, зато более интенсивным поглощением в области энергий с $E > 3.1$ эВ. Это вызвано тем, что ионы Ce^{3+} подавляют образование собственных дырочных центров окраски, которые возникают в стекле без церия за счет захвата дырок структурными фрагментами самой матрицы. Представление о виде спектра поглощения собственных центров окраски матрицы дает кривая 2 на рис. 9.5. Что же касается увеличения наведенного поглощения в области энергий, превышающих 3.1 эВ, при переходе от стекла с церием (кривая 1) к стеклу без церия (кривая 2), то оно обусловлено радиационно-стимулированным окислением ионов Ce^{3+} с образованием примесных дырочных центров окраски $(Ce^{3+})^+$, которые характеризуются очень интенсивной и широкой полосой поглощения с максимумом в ближней УФ-области спектра (глава 7).

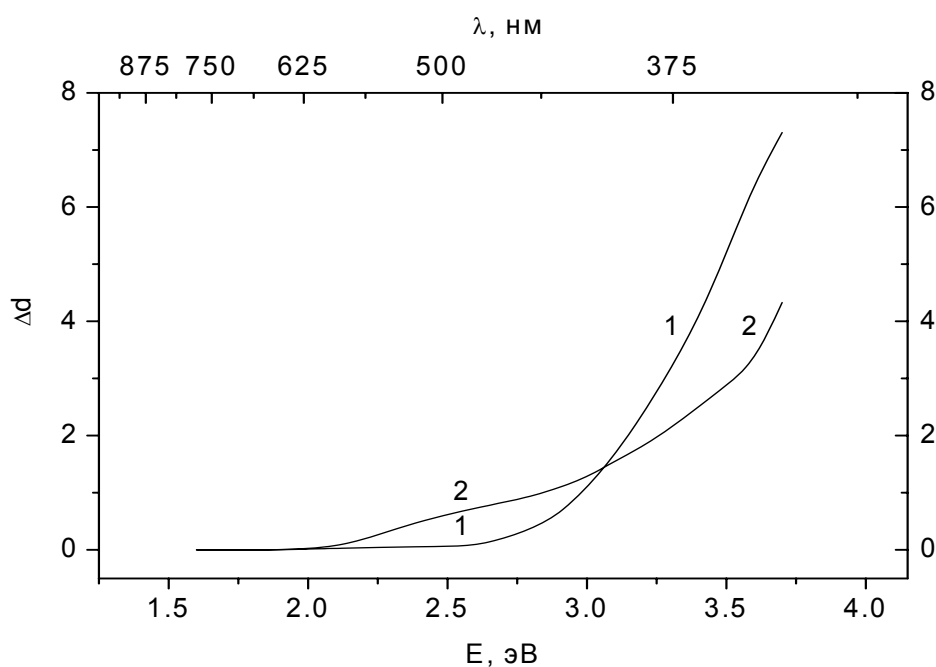


Рис. 9.5. Спектры наведенного радиацией поглощения стекол 112 состава с (1) и без (2) церия после 4 часов облучения рентгеновскими квантами (W-катод, 40 кВ, 20 мА) при комнатной температуре.

Сравнительные измерения радиационно-оптической устойчивости стекла состава 112 и многосвинцовых силикатных стекол выявляют его существенное преимущество перед традиционными радиационно-стойкими флинтами (табл. 9.6). В самом деле, пропускающая способность стекла 112 состава даже при дозе в 10^7 Р уменьшается в значительно меньшей степени, чем у стекол ТФ103, ТФ105 и ТФ110 при дозе в 10^6 Р и лишь немногим превосходит ее снижение у стекла ТФ105 при дозе в 10^5 Р. При этом, разумеется, следует помнить, что и исходная пропускающая способность стекла 112 состава в ближней УФ и синей областях спектра существенно выше, чем у силикатных радиационно-стойких многосвинцовых стекол. Иными словами, стекло 112 состава при облучении γ -квантами характеризуется меньшим снижением пропускающей способности в гораздо более широком спектральном диапазоне, включающем видимую область спектра, чем традиционные радиационно-стойкие многосвинцовые силикатные стекла. Пожалуй, в ряду отечественных силикатных свинецсодержащих стекол более устойчивым к излучению является стекло ТФ200: $\Delta d = 0.026$ при дозе в $2 \cdot 10^6$ Р, а при более высоких дозах наблюдается даже снижение значения Δd до 0.018 при дозе $1 \cdot 10^7$ Р (в этом находит свое проявление эффект радиационного отжига центров окраски). Однако по другим параметрам стекло ТФ200 как защитный материал сильно уступает стеклу 112 состава:

граница его полупропускания находится при 420 нм, что говорит о исходно низком визуальном светопропускании, а концентрация PbO равна всего 22.46 мол. %, что означает существенно более низкое значение коэффициента ослабления γ -излучения.

Таблица 9.6. Радиационно-оптическая устойчивость (интегральное светопропускание в видимой области спектра) многосвинцовых стекол.

Экспозиц. доза облучения, Р:	Δd (Т, %) для образцов стекол толщиной 1 см			
	112	ТФ103	ТФ105	ТФ110
10^5	0.018 (95.9)	0.069 (85.3)	0.088 (81.7)	0.058 (87.5)
10^6	0.070 (85.1)	0.187 (65.0)	0.285 (51.9)	0.147 (71.2)

На рис. 9.6 представлены спектры линейного коэффициента ослабления γ -излучения многосвинцовых стекол, спектры пропускания которых приведены на рис. 9.4. Из рис. 9.6 следует, что во всем диапазоне энергий γ -квантов от 0.5 до 3.0 МэВ стекло 112 состава (кривая 1) характеризуется более высокими значениями μ , чем стекла ТФ110 (кривая 2), ТФ105 (кривая 3) и ТФ103 (кривая 4). Так, значения μ для γ -квантов Cs^{137} равны, соответственно, 0.391, 0.355, 0.325 и 0.316 см^{-1} , а для γ -квантов Co^{60} – 0.252, 0.218, 0.191 и 0.166 см^{-1} . (Для примера укажем значения линейного коэффициента ослабления γ -квантов указанных источников воздухом при 20 °С и атмосферном давлении в 101.3 кПа: $9.3 \cdot 10^{-5}$ и $6.8 \cdot 10^{-5}$ см^{-1}). Значения толщины половинного и десятикратного ослабления излучения Co^{60} для стекла 112 состава равны 2.75 и 9.14 мм, а излучения Cs^{137} – 1.77 и 5.89 мм, соответственно. Эти данные превосходят аналогичные данные даже стекла ТФ110 (см. табл. 9.4), которое характеризуется максимальным содержанием оксида свинца в ряду радиационно-стойких тяжелых флинтгов, и убедительно свидетельствуют о том, что в ряду сравниваемых многосвинцовых стекол фосфатное стекло 112 состава характеризуется наиболее высокими защитными свойствами. Иными словами, достижение одних и тех же кратностей ослабления γ -излучения могло бы быть обеспечено стеклом 112 состава при меньшей толщине, чем в случае использования стекла ТФ110, не говоря уже о стеклах ТФ103 и ТФ105, которые отличаются от ТФ110 меньшими концентрациями PbO. Сочетание уникальных спектральных свойств, высокой радиационно-оптической устойчивости и повышенных защитных

свойств делают стекло 112 состава перспективным материалом для изготовления защитных смотровых окон специального назначения.

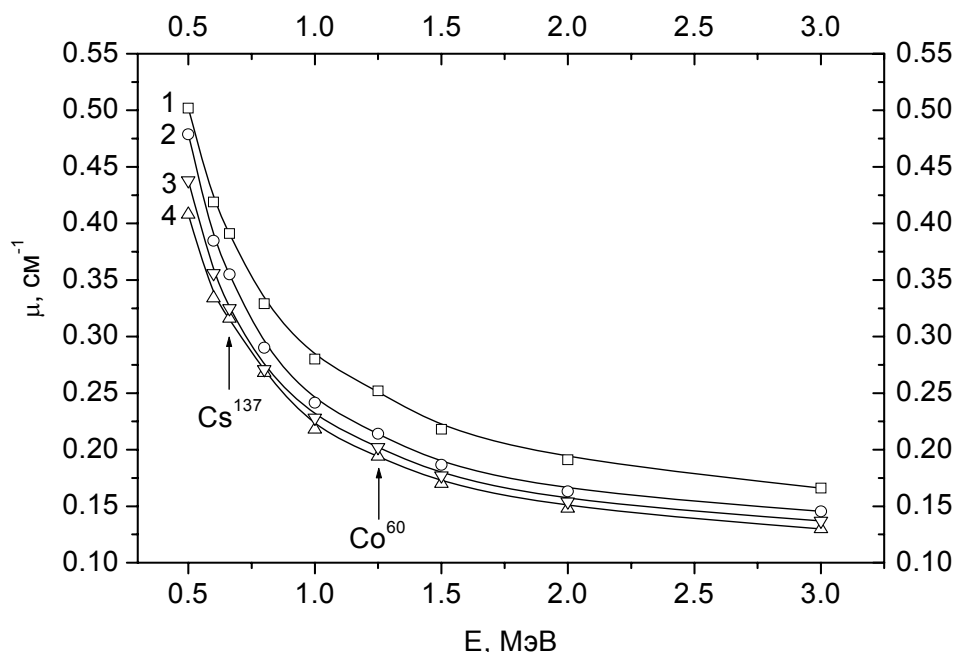


Рис. 9.6. Спектры линейного коэффициента ослабления γ -излучения многосвинцовыми стеклами: стеклом 112 состава (1) и тяжелыми флинтами ТФ110 (2), ТФ105 (3) и ТФ103 (4).

Этот тезис хорошо подтверждается данными рис. 9.7, на котором для того же диапазона энергий γ -квантов, что и на рис. 9.6, приведены значения толщины стекол, эквивалентных по линейному коэффициенту ослабления слою металлического свинца толщиной в 1 см. Для γ -квантов Cs^{137} 1 см свинца по защитным свойствам может быть заменен слоями в 3.06 см стекла 112 состава, в 3.37 см стекла ТФ110, в 3.68 см стекла ТФ105 и в 3.79 см стекла ТФ103. Для γ -квантов Co^{60} эти толщины равны 2.67, 3.15, 3.34 и 3.48 см, соответственно. При этом немаловажно отметить и то обстоятельство, что стекло 112 состава среди сравниваемых многосвинцовых стекол имеет плотность, равную 4.31 г/см^3 , тогда как у других стекол она выше: 4.46 г/см^3 у ТФ103, 4.77 г/см^3 у ТФ105 и 5.19 г/см^3 у ТФ110. Это означает, что и масса окон из стекла 112 состава при тех же защитных свойствах будет существенно ниже, чем в случае их изготовления из многосвинцовых силикатных стекол.

Чтобы понять причину более высоких значений линейного коэффициента ослабления γ -излучения в энергетической области от 0.5 до 3.0 МэВ у фосфатного флинтowego стекла 112 состава по сравнению с таковыми у многосвинцовых силикатных флинтов ТФ103, ТФ105 и ТФ110,

проанализируем данные, во-первых, по массовым коэффициентам ослабления фотонного излучения (табл. 9.7) тех химических элементов, которые не представлены в таблице 9.2, но входят в состав 112 стекла, и, во-вторых, по числу атомов разного типа в 1 см^3 сравниваемых стекол (табл. 9.8).

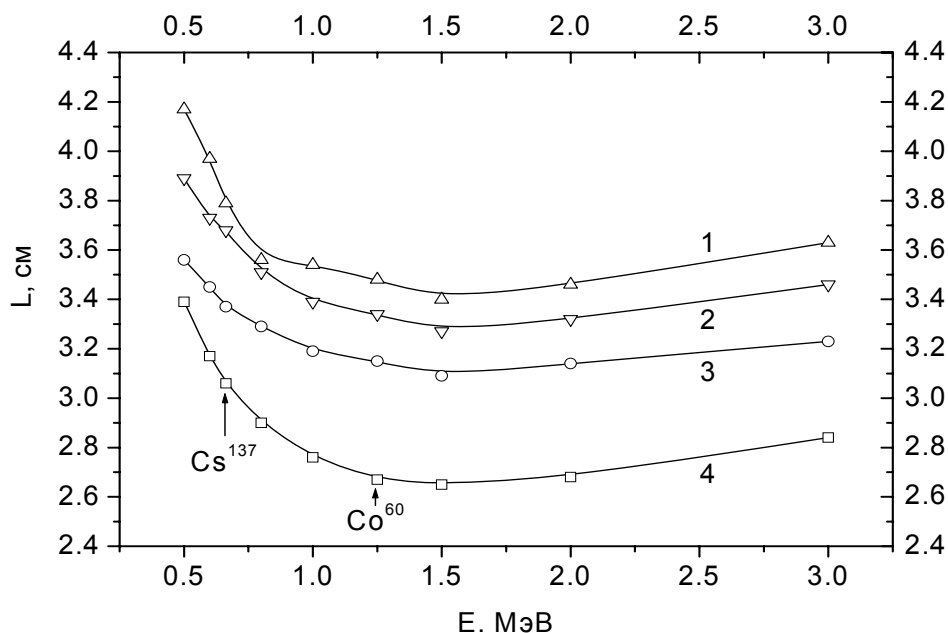


Рис. 9.7. Зависимость толщины стекол ТФ103 (1), ТФ105 (2), ТФ110 (3) и стекла 112 состава (4), эквивалентных по коэффициенту ослабления излучения 1 см свинца, от энергии квантов.

Сопоставление данных табл. 9.2 с таковыми табл. 9.7 показывает, что все элементы, представленные в ней, в энергетическом диапазоне от 0.5 до 3.0 МэВ характеризуются практически такими же значениями массового коэффициента ослабления γ -излучения, как кислород, но несколько уступающими значениям μ свинца. А теперь рассчитаем абсолютные концентрации атомов элементов, входящих в состав сравниваемых стекол. Зная молярный состав стекла 112, легко получить, что его молярная масса равна 170.5 г/моль . Поскольку плотность стекла – 4.31 г/см^3 , то сказанное выше означает, что молярный объем стекла составляет $39.6 \text{ см}^3/\text{моль}$. Если учесть, что 1 моль вещества содержит $6.02 \cdot 10^{23}$ структурных единиц (молекул), то получается, что абсолютная концентрация молекул в стекле 112 состава равна $15.2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Аналогичные расчеты для тяжелых силикатных стекол ТФ103, ТФ105 и ТФ110 дают следующие значения молярного объема ($25.1, 24.8$ и $24.3 \text{ см}^3/\text{моль}$) и абсолютной концентрации молекул ($24.0 \cdot 10^{21}, 24.3 \cdot 10^{21}$ и $24.8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$). Тогда, зная состав молекул, можно произвести и расчет числа атомов элементов в 1 см^3 стекол. Данные по абсолютным концентрациям атомов в сравниваемых радиационно-

стойких многосвинцовых силикатных и фосфатных стеклах представлены в табл. 9.8.

Таблица 9.7. Массовые коэффициенты ослабления (μ/ρ , см²/г) фотонного излучения химическими элементами, входящими в состав стекла 112.

E , МэВ	¹³ Al	³⁰ Zn	⁴¹ Nb	⁵¹ Sb
0.02	3.19	35.8	78.4	21.3
0.03	0.973	11.5	25.7	6.78
0.04	0.473	5.13	11.8	19.6
0.05	0.308	2.73	6.41	10.8
0.06	0.237	1.63	3.86	6.58
0.08	0.179	0.766	1.76	3.03
0.10	0.156	0.451	0.972	1.65
0.15	0.131	0.214	0.374	0.599
0.20	0.119	0.150	0.218	0.317
0.30	0.102	0.109	0.127	0.157
0.40	0.0917	0.0921	0.0992	0.111
0.50	0.0839	0.0825	0.0856	0.0905
0.60	0.0775	0.0755	0.0765	0.0787
0.80	0.0681	0.0658	0.0648	0.0648
1.0	0.0612	0.0589	0.0578	0.0569
1.5	0.0500	0.0480	0.0469	0.0457
2.0	0.0431	0.0422	0.0415	0.0406
3.0	0.0355	0.0361	0.0366	0.0365

Таблица 9.8. Абсолютные концентрации (10^{20} см⁻³) атомов элементов в многосвинцовых силикатных и фосфатных стеклах.

Стекло	Si	P	O	Pb	Al	K	Na	Zn	Nb	Sb	Ce	Всего
ТФ103	152	–	396	74	–	24	–	–	–	–	0.3	646.3
ТФ105	149	–	393	85	–	16	–	–	–	–	0.3	643.3
ТФ110	143	–	390	99		6.4	5	–	–	–	0.2	643.6
112	–	150	471	61	14	9	–	3	1.5	0.6	0.3	710.4

Для проверки правильности проделанных расчетов определим массу 1 см³ стекла 112. Для этого число атомов каждого типа умножим на его атомную массу и полученные величины сложим. Это будет выглядеть следующим образом: $(150 \cdot 30.97 + 471 \cdot 16 + 61 \cdot 207 + 14 \cdot 27 + 9 \cdot 39.1 + 3 \cdot 65.4 + 1.5 \cdot 92.9 + 0.6 \cdot 121.75 + 0.3 \cdot 140) \cdot 10^{20}$ а. е. м. (атомных единиц массы) = $25984.9 \cdot 10^{20}$ а. е. м. Чтобы выразить полученную массу в граммах, надо умножить результат вычислений на $1.66 \cdot 10^{-24}$ г/а. е. м.. В

итоге получим: $25984.9 \cdot 10^{20} \cdot 1.66 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 4.31 \text{ г}$. Поскольку мы определяли массу 1 см^3 стекла 112, мы получили тем самым его расчетную плотность, которая полностью совпала с плотностью, определенной экспериментально (4.31 г/см^3). Для силикатных тяжелых флинтв аналогичные расчеты также дают значения их экспериментально определенной плотности, что свидетельствует о корректности проведенных вычислений концентраций атомов элементов, входящих в состав стекол.

Как видно из табл. 9.8, суммарная концентрация атомов всех типов в стекле 112 состава примерно на 10 % выше, чем в силикатных стеклах ТФ103, ТФ105 и ТФ110. Это обеспечивается прежде всего атомами кислорода, абсолютная концентрация которых в стекле 112 состава более чем на 20 % превосходит таковую в названных силикатных тяжелых флинтах. Именно это – столь сильное – преобладание атомов кислорода в 112 стекле является причиной более высоких, чем у стекол ТФ103, ТФ105 и ТФ110, значений его линейного коэффициента ослабления фотонного излучения в рассматриваемом энергетическом диапазоне. Отмеченное преобладание атомов кислорода в составе стекла 112 приводит к еще двум следствиям. Во-первых оно компенсирует тот проигрыш в значениях μ стекла 112, который вызывается более низкой, чем у названных силикатных тяжелых флинтв, абсолютной концентрацией атомов свинца. Во-вторых, оно обуславливает более низкую плотность стекла 112 (4.31 г/см^3) по сравнению с плотностью стекол ТФ110 (5.19 г/см^3), ТФ105 (4.77 г/см^3) и ТФ103 (4.46 г/см^3).

Приведем кривые ослабления γ -излучения ^{60}Co (рис. 9.8 и 9.9) и Cs^{137} (рис. 9.10 и 9.11) стеклом 112 состава. По защитным характеристикам стекло 112 состава уступает только двум многосвинцовым стеклам – RS520 и RS620, – производимым фирмой Шотт, Германия. Так, значения коэффициента ослабления γ -квантов Cs^{137} у этих стекол равны 0.48 и 0.59 см^{-1} , соответственно. Однако эти стекла не являются радиационно-стойкими, так как не содержат в своем составе оксида церия, что не позволяет использовать их для изготовления защитных смотровых окон устройств, работающих в условиях высоких радиационных нагрузок. Кроме того, их граница полупропускания находится при 421 и 470 нм , соответственно, что говорит о наличии у них исходной желтой окраски. Если же для повышения их радиационно-оптической устойчивости ввести в их состав оксид церия, интенсивность исходной желтой окраски только усилится. Далее, они характеризуются более высокой, чем стекло 112 состава, плотностью – 5.20 и 6.20 г/см^3 , – что может рассматриваться как недостаток при использовании смотровых защитных окон из этих стекол в устройствах с лимитированной массой. Наконец, эти стекла имеют более высокий показатель преломления (1.80 и 1.95), что означает более высокие потери за счет Френелевского отражения света от границ «стекло –

воздух» (по 8.2 и 10.4 % на каждой границе вместо 6.67 % у стекла 112 состава).

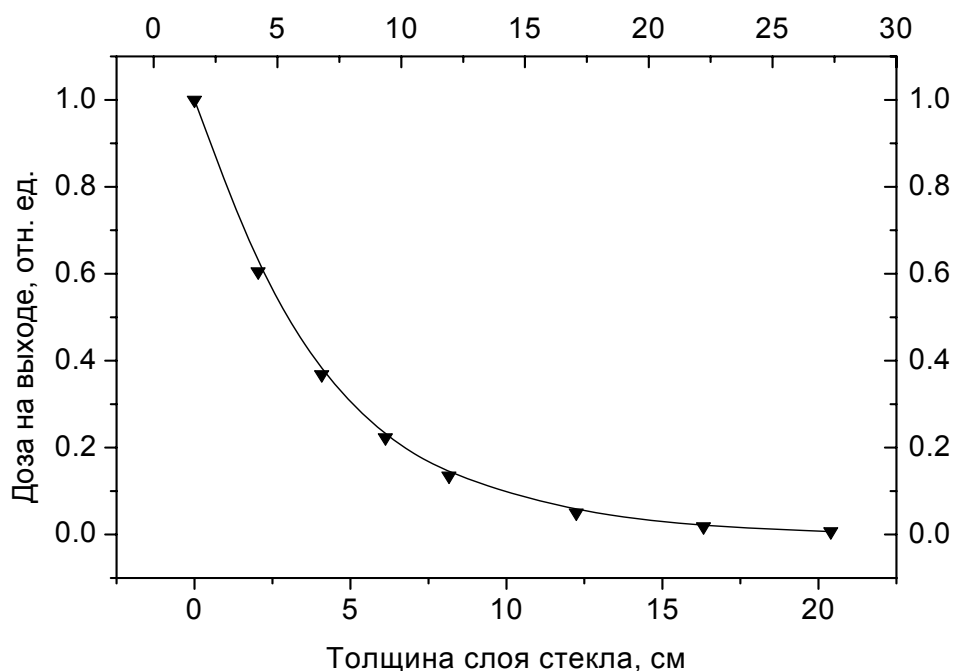


Рис. 9.8. Ослабление γ -излучения Co^{60} стеклом 112 состава в линейном масштабе.

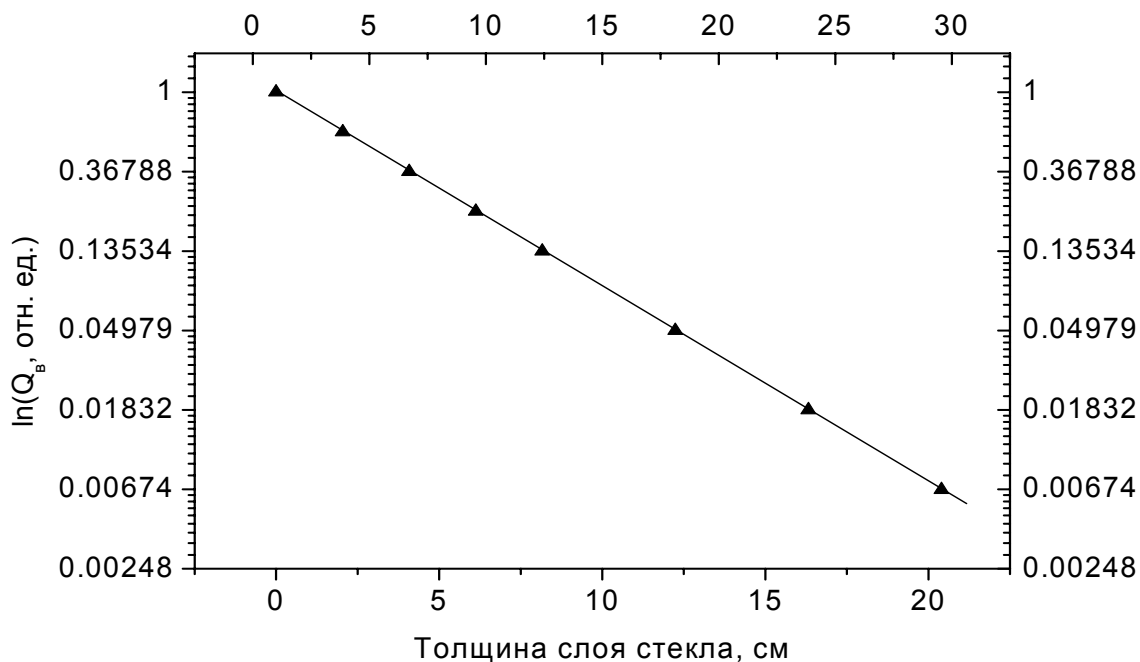


Рис. 9.9. Ослабление γ -излучения Co^{60} стеклом 112 состава в полулогарифмическом масштабе.

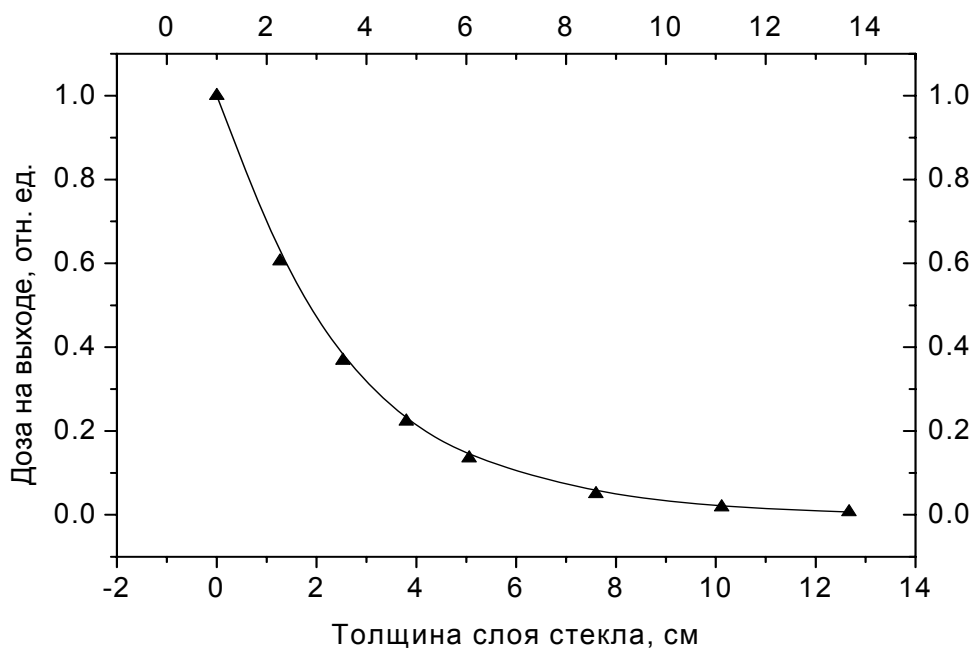


Рис. 9.10. Ослабление γ -излучения Cs^{137} стеклом 112 состава в линейном масштабе.

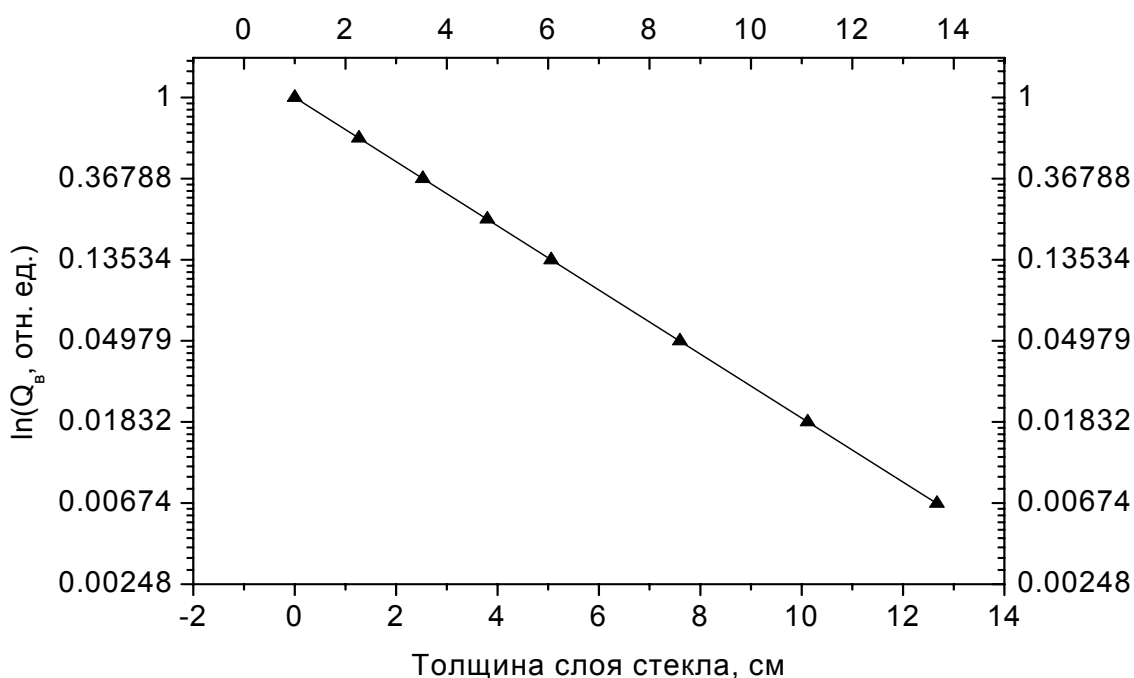


Рис. 9.11. Ослабление γ -излучения Cs^{137} стеклом 112 состава в полулогарифмическом масштабе.

Таким образом, на основе сказанного можно считать, что найден состав бесцветного фосфатного радиационно-стойкого многосвинцового

стекла, которое по комплексу спектральных, радиационно-оптических и защитных свойств значительно превосходит все существующие радиационно-стойкие тяжелые отечественные силикатные флинты серий 100 и 200 и защитные стекла типа RS германского производства. Заметим также, что по оптическим параметрам новое стекло на диаграмме Аббе попадает в промежуток между тяжелыми флинтами и тяжелыми баритовыми флинтами, восполняя отсутствие последних в каталогах радиационно-стойких стекол.