

УДК 548

## РОЛЬ ПЛОТНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ КРОНОВОЙ ГРУППЫ В ФОРМИРОВАНИИ ИХ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2025 В. И. Арбузов

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного маршала авиации А.А. Новикова, 196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

e-mail: viarb@yandex.ru; kafedra5@bk.ru

Поступила в редакцию 24.11.2024

После доработки 09.12.2024

Принята к публикации 27.02.2025

Исследована зависимость линейных коэффициентов ослабления рентгеновского и гамма-излучения (ЛКОИ) в диапазоне энергий квантов  $E$ , от 0.2 до 3.0 МэВ оптическими стеклами кроновой группы от их плотности при ее изменении от 2.21 до 4.61 г/см<sup>3</sup>. Базой для исследования служили как литературные данные по ЛКОИ стекол, так и полученные в настоящей работе. Для этого были рассчитаны массовые коэффициенты ослабления излучения (МКОИ) оксидами, используемыми в производстве кроновых стекол. Было установлено, что базовые оксиды ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), входящие во все типы кроновых стекол (ЛК, К, ФК, ТФК, БК, ТК, СТК), характеризуются сравнительно слабой зависимостью МКОИ от  $E$ . В отличии от этого более “тяжелые” оксиды ( $\text{PbO}$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{CdO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), применяемые для получения стекол БК, ФК, ТФК, ТК и СТК определенных марок, демонстрируют сильную зависимость МКОИ от  $E$  в диапазоне энергий от 0.2 до примерно 1.0 МэВ, а в области более высоких энергий квантов – близкую к таковой для базовых оксидов. Показано, что для излучений с  $E$ , равными 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 и 3.0 МэВ значения ЛКОИ стекол кроновой группы хорошо укладываются на прямые линии в зависимости от плотности, углы наклона которых уменьшаются с ростом  $E$ . Выведены уравнения, описывающие эти прямые линии, позволяющие с хорошей точностью рассчитать ЛКОИ стекол по их плотности. У некоторых марок стекол типа БК, ТК и СТК при значениях  $E$  от 0.2 до 0.4 (0.5) МэВ значения ЛКОИ располагаются ниже названных прямых. Это объяснено различием в номенклатуре и концентрациях “тяжелых” оксидов в этих стеклах и в ближайших к ним по плотности стеклах других марок, у которых значения ЛКОИ хорошо укладываются на прямые линии. При значениях  $E$  от 0.5 (0.6) до 3.0 МэВ никаких отклонений значений ЛКОИ этих стекол от прямых линий не наблюдается.

**Ключевые слова:** оптические стекла, их элементный состав и линейные коэффициенты ослабления рентгеновского и гамма-излучения (ЛКОИ), массовые коэффициенты ослабления излучения оксидами – компонентами стекол (МКОИ), зависимость МКОИ оксидов и ЛКОИ стекол от их плотности и энергии квантов высокозергетического ионизирующего излучения

DOI: 10.31857/S0132665125010037, EDN: EACYII

## ВВЕДЕНИЕ

Надежная информация о количественных характеристиках ослабления рентгеновского и гамма-излучения оптическими и радиационно-стойкими стеклами играет важную роль, по крайней мере, в двух направлениях приборостроения специального назначения. Первое направление представляет собой расчет степени снижения визуальной пропускающей способности оптических приборов, которые предназначены для функционирования в радиационных полях при заданных радиационных нагрузках. К ним могут быть отнесены, например, объективы космического базирования. Проведение такого расчета может выявить “слабые звенья” объектива – одну или сразу несколько линз из стекол тех или иных марок, которые в максимальной степени снижают пропускающую способность всего объектива, выводя этот показатель за пределы требований технического задания на прибор. Такие “слабые звенья” приходится в итоге заменять линзами, выполненными из стекол с более высокой радиационно-оптической устойчивостью (РОУ).

Второе направление связано с конструированием смотровых радиационно-защитных окон (СРЗО). Такие окна, с одной стороны, позволяют оператору, находящемуся в безопасной “чистой зоне”, не только наблюдать за высокоактивными объектами в “горячей” камере, отделенными от него несколькими пластинами стекол СРЗО, но и совершать над ними определенные операции с помощью механических манипуляторов. С другой стороны, СРЗО надежно защищают оператора от облучения названными объектами. Понятно, что от правильного выбора стекол для СРЗО будет зависеть его исходная пропускающая способность, степень ее снижения в ходе эксплуатации, а также толщина суммарной сборки из пластин радиационно-стойких и обычных оптических стекол при требуемой кратности ослабления излучения смотровым радиационно-защитным окном.

В обоих случаях естественно возникает вопрос о том, где взять информацию о линейных коэффициентах ослабления высокоэнергетического фотонного ионизирующего излучения (ВФИИ) оптическими и радиационно-стойкими стеклами, широко применяемыми в оптических приборах специального назначения. В работе [1] был выполнен расчет линейных коэффициентов ослабления (ЛКОИ),  $\mu$ , рентгеновского и  $\gamma$ -излучения для представительного ряда из 48 марок типовых оптических и радиационно-стойких стекол. Значения ЛКОИ стекол для разных энергий квантов излучения,  $E$ , определялись по формуле:

$$\mu(E) = \sum \rho^* \left[ \alpha_i^* (\mu_i(E)/\rho_i) \right], \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность стекла конкретной марки,  $\alpha_i$  – полные массовые доли атомов каждого химического элемента в составе стекла (были рассчитаны автором по составам стекол [2, 4, 5]),  $(\mu_i(E)/\rho_i)$  – значения их массовых коэффициентов ослабления излучения (МКОИ) в указанном диапазоне энергий [7]. Суммирование в (1) велось по всем типам химических элементов в составе каждого стекла.

Следует, однако, отметить, что в упомянутые 48 марок входили не только одиночные марки стекол, но и пары или даже тройки стекол-аналогов одной марки, представленных в каталоге обычных бесцветных стекол [2] и в двух каталогах радиационно-стойких стекол [3, 4]. Напомним, что стекла-аналоги (например, стекла марок K8, K108 и K208), во-первых, характеризуются одинаковым ходом дисперсионной кривой, а во-вторых, они имеют практически одинаковые значения ЛКОИ при всех значениях  $E$ . Понятно, что 48 марок – это далеко не полный перечень

стекол трех каталогов [2–4]. Это означает, что либо надо попытаться хотя бы с какой-то погрешностью приписать тому или иному стеклу, не входящему в указанный перечень из 48 марок, его значение ЛКОИ, опираясь на известные данные других стекол близких составов, либо дополнить номенклатуру стекол с известными значениями ЛКОИ данными по другим стеклам, выходящим за пределы названного перечня. Решению этих двух задач как раз и посвящена настоящая работа.

#### *Зависимость значений ЛКОИ оптических стекол от их плотности*

Как следует из (1), линейные коэффициенты ослабления ВФИИ оптическими стеклами зависят от их плотности. Если бы эта зависимость была линейной, то это давало бы возможность определять ЛКОИ любого стекла по известным значениям ЛКОИ для других стекол и по соотношению их плотностей. Конечно, (1) говорит еще и о том, что значения ЛКОИ зависят и от энергии квантов ВФИИ  $E$ . Поэтому для начала представлялось целесообразным графически представить зависимость известных данных по ЛКОИ (см. табл. 1) от плотности стекол для какого-то одного значения  $E$ , скажем, равного 0.6 МэВ. Рис. 1 показывает, как располагаются на графике точки (значения ЛКОИ по данным [1]) в зависимости от плотности стекол кроновой и флинтовой групп.

Как следует из рис. 1, на его поле отчетливо выявляются три вида графиков названных выше зависимостей. Два графика (верхний и нижний) представляют собой прямые, а третий, промежуточный, имеет сложную форму. Нижняя синяя прямая описывает зависимость ЛКОИ кроновых стекол от их плотности, а верхняя красная прямая – ту же зависимость для свинецсодержащих флинтовых стекол. Что же касается промежуточной кривой (черная линия), лежащей между двумя названными прямыми, она отвечает пяти маркам стекол типа баритовых флинтов (табл. 1).

Данные рис. 1 убедительно говорят, во-первых, о разном ходе зависимостей значений ЛКОИ стекол разных групп от их плотности, а во-вторых, о том, что первая из названных задач исследования не имеет простого решения, и что поэтому всегда надо принимать во внимание химические составы сравниваемых стекол.

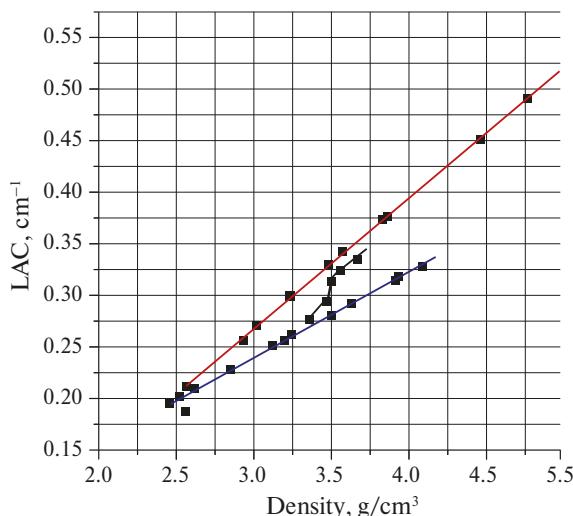


Рис. 1. Зависимость ЛКОИ оптических стекол от их плотности по данным [1].

**Таблица 1.** Зависимость ЛКОИ при  $E = 0.6$  МэВ широко используемых типов оптических стекол от их плотности [1]

№ п. п.	Марка стекла	Плотность, г/см <sup>3</sup>	ЛКОИ, см <sup>-1</sup>
1	ЛК3	2.46	0.1946
2	К8	2.52	0.2013
3	КФ4	2.57	0.2109
4	К19	2.62	0.2089
5	БК8	2.85	0.2277
6	Ф9	2.93	0.2555
7	ЛФ11	3.02	0.2701
8	БК10	3.12	0.2510
9	ТК2	3.20	0.2558
10	ЛФ5	3.23	0.2995
11	ТК23	3.24	0.2621
12	БФ219	3.36	0.2766
13	ФК14	3.39	0.2711
14	БФ25	3.47	0.2937
15	Ф6	3.48	0.3306
16	ТФК11	3.50	0.2798
17	БФ200	3.50	0.3140
18	БФ21	3.56	0.3243
19	Ф1	3.57	0.3421
20	ТКН1	3.63	0.2913
21	БФ12	3.67	0.3352
22	ТФ200	3.83	0.3729
23	ТФ1	3.86	0.3768
24	СТК3	3.91	0.3144
25	ТКН3	3.93	0.3175
26	СТК19	4.09	0.3274
27	ТФ3	4.46	0.4506
28	ТФ5	4.77	0.4910
29	ТФ10	5.19	0.5411

Понятно, что заняться сразу всеми тремя группами стекол не представляется возможным, поэтому более детально в настоящей работе будут рассмотрены только стекла кроновой группы, т. е. стекла типа обычных силикатных и фосфатных кронов (К и ФК), тяжелых и сверхтяжелых кронов (ТК, ТФК и СТК), баритовых и особых кронов (БК и ОК). При этом представляло интерес выяснить, во-первых, будут ли линейными зависимости значений ЛКОИ стекол от их плотностей для расширенного по сравнению с данными [1] перечня стекол, и во-вторых, как они будут изменяться количественно при варьировании энергии квантов ВФИИ.

Для этого были рассчитаны значения ЛКОИ еще для 21 марки оптических и радиационно-стойких стекол кроновой группы для значений  $E$  в пределах от 0.2 до 3.0 МэВ (табл. 2). Эти стекла с учетом перечня из 48 стекол [1]

**Таблица 2.** Зависимость ЛКОИ стекол кроновой группы от их плотности и энергии квантов рентгеновского и  $\gamma$ -излучения

Марка стекла	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	ЛКОИ, см <sup>-1</sup> , при $E$ , МэВ									
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0
КС*	2.21	0.2705	0.2340	0.2100	0.1920	0.1780	0.1560	0.1400	0.1140	0.0983	0.0802
ЛК5*/ЛК105*)	2.27	0.2791	0.2359	0.2061	0.1960	0.1818	0.1618	0.1433	0.1169	0.1005	0.0818
ЛК7/ЛК6	2.30	0.2824	0.2432	0.2180	0.1989	0.1841	0.1616	0.1453	0.1183	0.1019	0.0831
ЛК1*/ЛК4*	2.33	0.2865	0.2441	0.2182	0.2019	0.1865	0.1658	0.1466	0.1196	0.1029	0.0840
К2*(К102*)	2.38	0.2919	0.2491	0.2229	0.2051	0.1904	0.1691	0.1495	0.1219	0.1049	0.0857
ЛК3	2.46	0.2986	0.2572	0.2304	0.2103	0.1946	0.1709	0.1537	0.1251	0.1079	0.0880
К8	2.52	0.3258	0.2708	0.2310	0.2180	0.2013	0.1764	0.1585	0.1290	0.1112	0.0909
К19	2.62	0.3584	0.2865	0.2509	0.2269	0.2089	0.1826	0.1639	0.1333	0.1153	0.0948
К15*	2.76	0.4421	0.3181	0.2691	0.2412	0.2201	0.1919	0.1691	0.1379	0.1182	0.0999
БК4*/БК104*	2.76	0.4339	0.3182	0.2713	0.2418	0.2208	0.1918	0.1706	0.1388	0.1206	0.1002
БК8	2.85	0.4815	0.3370	0.2821	0.2498	0.2277	0.1971	0.1761	0.1429	0.1238	0.1028
БК6	2.86	0.4817	0.3380	0.2830	0.2508	0.2286	0.1979	0.1769	0.1436	0.1245	0.1036
БК11*	2.91	0.5148	0.3547	0.2916	0.2570	0.2343	0.2011	0.1790	0.1452	0.1257	0.1045
ФК13*	2.93	0.5218	0.3522	0.2941	0.2531	0.2361	0.2029	0.1783	0.1450	0.1279	0.1061
БК12*	3.02	0.5237	0.3621	0.3011	0.2670	0.2413	0.2087	0.1857	0.1510	0.1268	0.1093
БК200*	3.02	0.5509	0.3619	0.3052	0.2652	0.2390	0.2081	0.1859	0.1510	0.1312	0.1097
БК13*	3.04	0.5733	0.3788	0.3082	0.2703	0.2438	0.2092	0.1854	0.1511	0.1307	0.1097
БК10	3.12	0.6013	0.3903	0.3175	0.2775	0.2510	0.2157	0.1921	0.1556	0.1353	0.1133

Таблица 2. (Окончание)

Марка стекла	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	ЛКОИ, см <sup>-1</sup> , при $E$ , МэВ									
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	3.0
TK2	3.20	0.6202	0.4003	0.3244	0.2830	0.2558	0.2197	0.1957	0.1585	0.1380	0.1160
TK23	3.24	0.6774	0.4180	0.3364	0.2912	0.2621	0.2242	0.1994	0.1612	0.1403	0.1181
<b>ФК14 (формула 1)</b>	3.39	0.7406	0.4467	0.3519	0.3023	0.2711	0.2311	0.2049	0.1657	0.1445	0.1224
<b>ФК14 (уравнения табл. 4)</b>	3.39	0.7468	0.4444	0.3554	0.3054	0.2694	0.2357	0.2065	0.1672	0.1454	0.1223
ТФК11	3.50	0.7619	0.4604	0.3627	0.3118	0.2798	0.2385	0.2116	0.1710	0.1492	0.1263
TK14	3.51	0.8029	0.4764	0.3719	0.3183	0.2847	0.2421	0.2148	0.1734	0.1513	0.1283
TK16	3.56	0.8344	0.4859	0.3760	0.3203	0.2858	0.2423	0.2146	0.1733	0.1513	0.1289
TK20	3.58	0.8100	0.4810	0.3756	0.3216	0.2877	0.2447	0.2170	0.1753	0.1531	0.1301
TKH1	3.63	0.8543	0.4963	0.3835	0.3266	0.2913	0.2470	0.2186	0.1766	0.1544	0.1319
СТК15*	3.77	0.9249	0.5221	0.4112	0.3409	0.3039	0.2603	0.2272	0.1819	0.1601	0.1370
OK1*	3.77	0.7761	0.4818	0.3842	0.3354	0.2981	0.2551	0.2273	0.1841	0.1593	0.1350
OK2*	3.82	0.7863	0.4881	0.3863	0.3362	0.2987	0.2550	0.2261	0.1834	0.1602	0.1345
TKH3	3.93	0.9866	0.5555	0.4231	0.3576	0.3175	0.2679	0.2367	0.1909	0.1671	0.1432
TK21	3.98	1.0100	0.5657	0.4298	0.3627	0.3218	0.2714	0.2397	0.1931	0.1691	0.1449
СТК19	4.09	0.9436	0.5530	0.4299	0.3661	0.3274	0.2777	0.2459	0.1990	0.1734	0.1475
СТК11*	4.11	1.0942	0.5851	0.4568	0.3773	0.3309	0.2829	0.2472	0.2002	0.1741	0.1482
СТК7*	4.22	1.1442	0.6202	0.4742	0.3881	0.3410	0.2911	0.2529	0.2051	0.1722	0.1522
СТК20*	4.36	1.2161	0.6303	0.4918	0.3969	0.3451	0.2982	0.2601	0.2113	0.1781	0.1572
СТК16	4.61	1.1129	0.6441	0.4959	0.4201	0.3711	0.3213	0.2719	0.2239	0.1883	0.1663

\* Значения ЛКОИ были рассчитаны в рамках настоящей работы, для остальных стекол взяты из [1].

выбирались так, чтобы значения их плотности по мере ее возрастания в любой тройке “соседних” стекол при переходе от одного из них к другому были бы максимально близкими друг к другу, а в целом перекрывали бы более широкий диапазон от 2.21 до 4.61 г/см<sup>3</sup> (см. табл. 2) в отличие от “кроновой” прямой на рис. 1, для которой плотность стекол изменялась в диапазоне от 2.46 до 4.09 г/см<sup>3</sup> [1].

Далее, поскольку составы оптических стекол обычно указываются массовыми процентами оксидов, в [6] для указанного диапазона  $E$  были определены энергетические зависимости их МКОИ для 24 оксидов, KHF<sub>2</sub> и фтора, используемых в оптическом стекловарении. Поэтому ЛКОИ того или иного стекла дополнительного перечня вычислялся как произведение его плотности на сумму массовых долей ( $b_i$ ) оксидов в составе стекла, умноженных на значения их МКОИ  $[(\mu_i(E)/\rho_i)_{\text{окс}}]$  [6]:

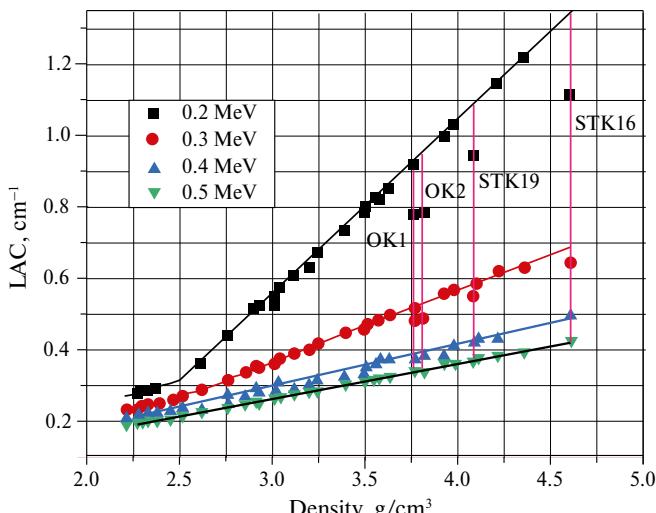
$$\mu = \sum \left[ b_i^* (\mu_i(E)/\rho_i)_{\text{окс}} \right]^* \rho_i \quad (2)$$

Значения МКОИ оксидов в (2) определялись в виде суммы произведений массовых долей катионов (МДК) и кислорода (МДО) в составе оксидов на значения их МКОИ (см. табл. 3) [6].

#### Зависимость значений ЛКОИ стекол кроновой группы от их плотности и энергии квантов ВФИИ

На рис. 2, 3 представлены зависимости ЛКОИ стекол кроновой группы от их плотности для разных значений энергии квантов ВФИИ. На рис. 2 выделяются 4 особенности.

Первая из них состоит в том, что на всех четырех графиках зависимости ЛКОИ от плотности для кварцевого стекла (КС), ЛК5 (ЛК105), ЛК7 (ЛК6), ЛК1 (ЛК4), К2 (К102) и ЛК3 (табл. 2) в диапазоне изменения плотности от 2.21 до 2.46 г/см<sup>3</sup>, будучи прямыми линиями, идут с меньшим углом наклона, чем такие же зависимости при более высоких значениях плотности. Это различие с ростом энергии квантов  $E$  практически исчезает к 0.5 МэВ, а при значениях  $E$  из диапазона 0.6–3.0 МэВ оно уже не наблюдается вовсе (рис. 3).



**Рис. 2.** Зависимость ЛКОИ стекол кроновой группы от их плотности и энергии квантов ВФИИ в диапазоне от 0.2 до 0.5 МэВ.

**Таблица 3.** Энергетические зависимости значений МКОИ оксидов – компонентов стекол кроновой группы

Базовые компоненты стекол кроновой группы [2–4, 6]

Оксид	Молярная масса г/моль	МКОИ, см <sup>2</sup> /г. при Е, МэВ						Типы стекол	
		0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0		
CaO	56.08	0.1278	0.0958	0.0873	0.0805	0.0707	0.0636	0.0518	0.0449
SiO <sub>2</sub>	60.08	0.1224	0.0953	0.0868	0.0804	0.0706	0.0629	0.0517	0.0445
Na <sub>2</sub> O	61.98	0.1183	0.0920	0.0841	0.0779	0.0685	0.0615	0.0503	0.0432
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69.62	0.1192	0.0932	0.0847	0.0787	0.0691	0.0623	0.0505	0.0434
ZnO	81.38	0.1445	0.0928	0.0833	0.0765	0.0677	0.0598	0.0486	0.0426
K <sub>2</sub> O	94.20	0.1245	0.0934	0.0851	0.0788	0.0690	0.0622	0.0507	0.0439
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.96	0.1205	0.0935	0.0853	0.0789	0.0693	0.0624	0.0508	0.0437
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	141.94	0.1216	0.0941	0.0857	0.0794	0.0697	0.0627	0.0510	0.0439
Добавки к базовым компонентам стекол кроновой группы [2–4, 6]									
ZrO <sub>2</sub>	123.22	0.1856	0.0966	0.0851	0.0767	0.0661	0.0588	0.0478	0.0420
CdO	128.41	0.2647	0.1064	0.0883	0.0781	0.0656	0.0581	0.0469	0.0415
BaO	153.34	0.3438	0.1174	0.0959	0.0807	0.0659	0.0573	0.0459	0.0407
PbO	223.20	0.9303	0.2064	0.1455	0.1148	0.0836	0.0677	0.0508	0.0451
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	225.81	0.1826	0.0960	0.0841	0.0763	0.0657	0.0585	0.0478	0.0418
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	325.81	0.3582	0.1198	0.0953	0.0821	0.0670	0.0581	0.0468	0.0412
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	441.90	0.6085	0.1614	0.1197	0.0981	0.0750	0.0635	0.0501	0.0435

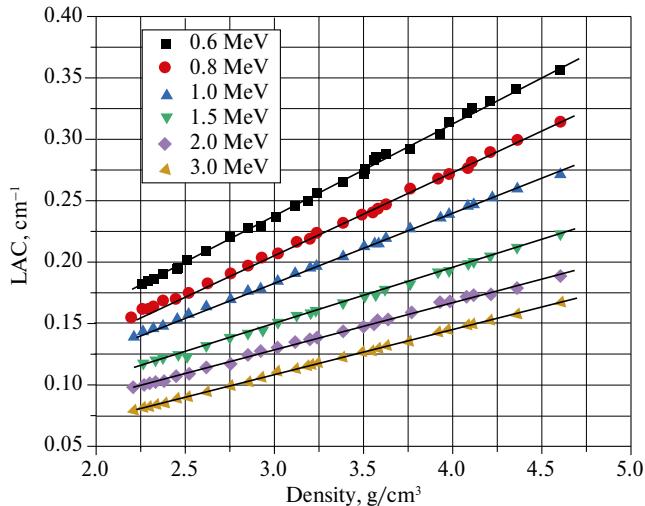


Рис. 3. Зависимость ЛКОИ стекол кроновой группы от их плотности и энергии квантов ВФИИ в диапазоне от 0.6 до 3.0 МэВ.

Вторая и третья особенности касаются стекол ОК1 ( $3.77 \text{ г}/\text{cm}^3$ ) и ОК2 ( $3.82 \text{ г}/\text{cm}^3$ ) соответственно, расчетные значения ЛКОИ которых лежат ниже прямых, описывающих зависимость ЛКОИ стекол от их плотности при энергиях квантов ВФИИ, равных 0.2 и 0.3 МэВ. При более высоких значениях  $E$  отклонения от прямых линий для названных стекол пропадают. Четвертой особенностью графиков на рис. 2 является то, что для стекол СТК19 ( $4.09 \text{ г}/\text{cm}^3$ ) и СТК16 ( $4.61 \text{ г}/\text{cm}^3$ ) значения их ЛКОИ оказываются ниже тех, которые должны были бы быть при расположении их точек на прямых линиях. Особенно сильно это отклонение наблюдается для верхнего (0.2 МэВ), в меньшей степени для второго сверху графика (0.3 МэВ) и почти исчезает на двух нижних графиках (0.4 и 0.5 МэВ),

Следует отметить, что точки на всех графиках рис. 2, 3 строго ложатся на прямые линии для каждой энергии квантов ВФИИ, кроме уже отмеченного диапазона плотности от 2.21 до 2.46  $\text{г}/\text{cm}^3$  на рис. 2 при значениях  $E$  из диапазона (0.2–0.5) МэВ.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объяснения этих особенностей обратимся к данным о значениях МКОИ оксидов, являющихся компонентами стекол кроновой группы, при  $E = 0.2 \text{ МэВ}$  [6]. Их набор для разных типов стекол оказывается разным, его можно разбить на 2 подгруппы: подгруппу базовых оксидов, входящих практически во все типы стекол кроновой группы, и подгруппу добавок к базовым оксидам, являющихся компонентами более узкого круга стекол (табл. 3). Понятно, что по мере того, как в составе стекол появляются оксиды со все более высокой молярной массой (см. табл. 3), плотность стекол увеличивается. Рост же значений ЛКОИ стекол при этом зависит как от их плотности, так и от количественного соотношения оксидов с разными молярными массами, у каждого из которых свои значения МКОИ.

Как следует из рис. 2 и табл. 2, у десяти стекол [КС, ЛК5 (ЛК105), ЛК7 (ЛК6), ЛК1 (ЛК4), К2 (К102)] угол наклона энергетических зависимостей ЛКОИ в диапазоне плотностей от 2.21 до 2.46  $\text{г}/\text{cm}^3$  меньше, чем при более высоких значениях

плотности. В составы стекол этого ряда входят в разных количественных соотношениях базовые оксиды, указанные в табл. 3. Из этой таблицы следует, что при переходе от одного базового компонента стекол кроновой группы к другому зависимости МКОИ от энергии квантов ВФИИ различаются не очень сильно. В целом же можно считать, что энергетические зависимости МКОИ базовых оксидов при вариации составов большей части стекол кроновой группы (табл. 3) можно описать почти совпадающими графиками для  $\text{SiO}_2$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  (рис. 4). А к росту значений ЛКОИ стекол указанного ряда при переходе от стекол с меньшей плотностью к стеклам с более высокими ее значениями приводит замена  $\text{Na}_2\text{O}$  на  $\text{K}_2\text{O}$  и увеличение его относительной концентрации [2], у которого значение МКОИ при  $E = 2$  МэВ выше, чем у других базовых оксидов за исключением  $\text{ZnO}$ , которого однако в составе перечисленных стекол нет.

Обратимся к данным для диапазона энергий квантов ВФИИ от 0.4 до 2.0 МэВ (табл. 3), взятым из работы [6]. По сравнению с областью энергий от 0.2 до 3.0 МэВ в [6] отмеченный диапазон намеренно обужен, чтобы разница значений МКОИ оксидов в его начале и конце была минимизирована. Это дает возможность выявить особенности графиков энергетических зависимостей МКОИ оксидов, являющихся компонентами исследуемых стекол (рис. 4). Однако, поскольку мы обсуждаем разницу в значениях ЛКОИ стекол при  $E = 2.0$  МэВ, значения МКОИ оксидов при этой энергии квантов также представлены в этой табл. 3.

При введении в состав стекол типа БК, ФК, ТФК, ТК, СТК в дополнение к базовым оксидам таких добавок, как  $\text{PbO}$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\text{ZrO}_2$ ) из-за их более высоких по сравнению с базовыми оксидами молярных масс наблюдается не только возрастание плотности стекол, но и заметное увеличение значений ЛКОИ в низкоэнергетической области. Это утверждение подтверждается данными как табл. 3, так и рис. 4. При этом обращает на себя внимание тот факт, что при  $E \geq 0.75$  МэВ вклад в ЛКОИ стекла такого оксида, как  $\text{BaO}$ , оказывается меньше, чем даже вклад оксидов-стеклообразователей. Нечто подобное наблюдается

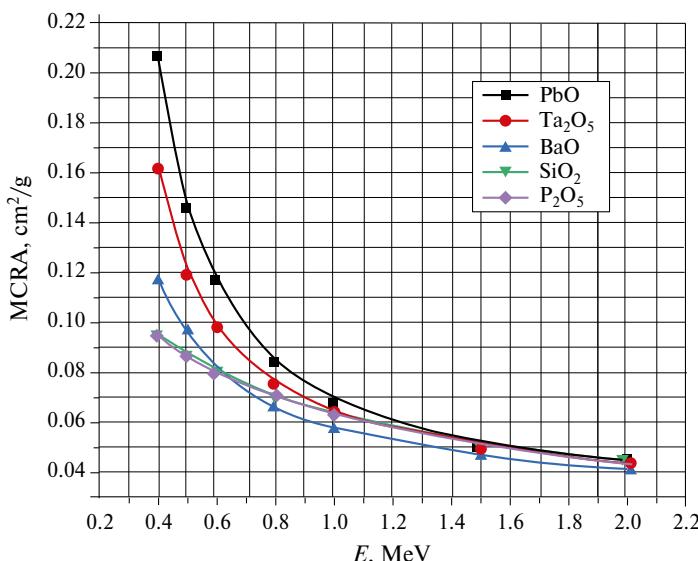


Рис. 4. Энергетическая зависимость МКОИ  $\text{PbO}$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

и в случае  $\text{La}_2\text{O}_3$ : при  $E \geq 0.65$  МэВ он оказывает меньшее влияние на формирование ЛКОИ стекол, чем  $\text{SiO}_2$  ( $\text{CaO}$ ) (см. рис. 5).

Теперь обратимся к названным особенностям рис. 2, а именно к более низким значениям ЛКОИ стекол ОК1 ( $3.77 \text{ г}/\text{см}^3$ ) и ОК2 ( $3.82 \text{ г}/\text{см}^3$ ), а также СТК19 ( $4.09 \text{ г}/\text{см}^3$ ) и СТК16 ( $4.61 \text{ г}/\text{см}^3$ ) по сравнению с теми значениями, которые эти стекла могли бы иметь, если бы точки, отвечающие этим стеклам на графиках рис. 2, находились бы на прямых, а не ниже них. Сравним составы названных стекол с составами других, соседних на шкале плотности, стекол.

Более низкие значения ЛКОИ стекол ОК1 и ОК2 обусловлены, во-первых, достаточно высокой концентрацией фтора (20.09% и 15.48% соответственно), а также тем, что вклад  $\text{BaO}$  (36.97% и 39.13% соответственно) в сумму значений МКОИ всех оксидов этих стекол заметно уступает ( $0.1271 \text{ см}^2/\text{г}$ ) суммарному вкладу 34.90%  $\text{La}_2\text{O}_3$  и 8.28%  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $0.1754 \text{ см}^2/\text{г}$ ) в стекле К15 с той же плотностью, что и у стекла ОК1 при примерно одинаковых вкладах в сумму значений МКОИ со стороны базовых оксидов.

Что касается стекла СТК19, ближе всего к нему по плотности оказывается стекло ТК21 ( $3.98 \text{ г}/\text{см}^3$ ), а к стеклу СТК 16 – стекло СТК20 ( $4.36 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Кроме базовых оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{ZnO}$ , соответствующие значения плотности и ЛКОИ у стекла СТК 19 обеспечивают 36.40 мас. %  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 4.85 мас. %  $\text{ZrO}_2$ , 2.90 мас. %  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  и 5.90 мас. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , тогда как у стекла ТК21 – 2.45 мас. %  $\text{PbO}$  и 46.76 мас. %  $\text{BaO}$  [2]. Умножение МКОИ оксидов, набранных полужирным шрифтом, на их массовые доли в стеклах показывает, что вклад оксидов свинца и бария в сумму значений МКОИ стекла ТК21 ( $0.1836 \text{ см}^2/\text{г}$ ) заметно превосходит таковой оксидов лантана и тантала в ЛКОИ стекла СТК19 ( $0.1480 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

В паре стекол СТК16 и СТК20 ситуация следующая. Наряду с базовыми оксидами основной вклад в ЛКОИ стекла СТК16 вносят 31.50 мас. %  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 17.8 мас. %  $\text{CdO}$  и 5.1 мас. %  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  с суммарным значением МКОИ, равным  $0.1909 \text{ см}^2/\text{г}$ . В составе стекла СТК20 41.90 мас. %  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 2.79 мас. %  $\text{ZrO}_2$ , 4.00 мас. %  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

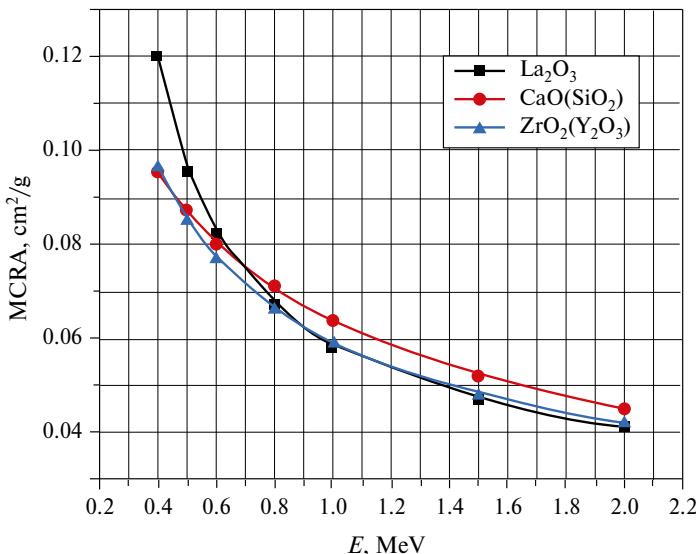


Рис. 5. Энергетическая зависимость МКОИ  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  ( $\text{SiO}_2$ ) и  $\text{ZrO}_2$  ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ).

и 6.52 мас. %  $\text{HfO}_2$  (близок к  $\text{ZrO}_2$ ) обеспечивают суммарное значение МКОИ на уровне  $0.2385 \text{ см}^2/\text{г}$  в дополнение к вкладу базовых оксидов.

Таким образом, именно из-за различия в приведенных суммарных значениях МКОИ оксидов в составах стекол ОК1 и ОК2 по сравнению с таковыми стекла К15, с одной стороны, и СТК19 и СТК16 по сравнению с таковыми у стекол ТК21 и СТК20, с другой стороны, значения ЛКОИ стекол ОК1, ОК2, СТК19 и СТК16 для значений энергии квантов ВФИИ от 0.2 до 0.3 (0.4) МэВ не укладываются на прямые линии графиков зависимости ЛКОИ от плотности, а лежат ниже них.

Как следует из рис. 2, 3, зависимости значений ЛКОИ стекол кроновой группы от их плотности при варьировании энергий квантов от 0.2 до 3.0 МэВ хорошо укладываются на прямые линии. В табл. 4 приведены уравнения, описывающие эти прямые линии как для всего диапазона изменения плотности (от 2.21 до  $4.61 \text{ г}/\text{см}^3$ ) при переходе от стекла к стеклу, так и для ряда стекол с малой плотностью (от 2.21 до  $2.46 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Проверим точность такой аппроксимации на примере стекла ФК14, расположенного точно в середине диапазона изменения плотности ( $3.39 \text{ г}/\text{см}^3$ ) в исследуемых стеклах (табл. 2). Значения ЛКОИ этого стекла, рассчитанные по уравнениям прямых для всех значений энергий квантов ВФИИ от 0.2 до 3.0 МэВ, указаны в табл. 2 под строкой, в которой приведены результаты расчетов ЛКОИ (1). Видно, что данные двух строк, соответствующие одним и тем же значениям  $E$ , с очень высокой степенью точности совпадают друг с другом. Это означает, что формулами табл. 4 можно пользоваться для экспрессного определения значений ЛКОИ по значениям плотностей либо вновь разработанных кроновых стекол, либо стекол кроновой группы из каталога оптических стекол, для которых значения ЛКОИ пока еще не известны.

**Таблица 4.** Уравнения, описывающие зависимость ЛКОИ стекол кроновой группы от плотности при варьировании энергии квантов рентгеновского и  $\gamma$ -излучения

№ п/п	Энергия квантов ВФИИ, МэВ	Зависимость ЛКОИ ( $\mu, \text{ см}^{-1}$ ) от плотности стекол ( $\rho$ ) в диапазоне от 2.21 до $4.61 \text{ г}/\text{см}^3$	Зависимость ЛКОИ ( $\mu, \text{ см}^{-1}$ ) от плотности ряда стекол ( $\rho$ ) в диапазоне от 2.21 до $2.46 \text{ г}/\text{см}^3$
1	0.2	$\mu = 0.4840\rho - 0.8940$	$\mu = 0.1124\rho + 0.0220$
2	0.3	$\mu = 0.2010\rho - 0.2370$	$\mu = 0.1008\rho + 0.0112$
3	0.4	$\mu = 0.1420\rho - 0.1260$	$\mu = 0.0816\rho + 0.0296$
4	0.5	$\mu = 0.1010\rho - 0.0370$	$\mu = 0.0732\rho + 0.0076$
5	0.6	$\mu = 0.0782\rho + 0.0043$	—
6	0.8	$\mu = 0.0660\rho + 0.0120$	—
7	1.0	$\mu = 0.0565\rho + 0.0150$	—
8	1.5	$\mu = 0.0449\rho + 0.0150$	—
9	2.0	$\mu = 0.0401\rho + 0.0095$	—
10	3.0	$\mu = 0.0361\rho - 0.0001$	—

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку линейные коэффициенты ослабления рентгеновского и гаммаизлучения (ЛКОИ) оптических стекол определяются произведением их плотности на сумму массовых коэффициентов ослабления излучения (МКОИ) химическими

элементами в составе стекол, представлялось целесообразным в настоящей работе выяснить характер зависимости значений ЛКОИ от плотности стекол для излучения с энергией квантов  $E$  от 0.2 до 3.0 МэВ. Оказалось, что для излучения с выбранной  $E = 0.6$  МэВ построенная на основе литературных данных по 29 маркам стекол эта зависимость для кронов (13 марок с плотностями от 2.46 до 4.09 г/см<sup>3</sup>) и свинецсодержащих флинтов (11 марок с плотностями от 2.57 до 5.19 г/см<sup>3</sup>) описывается прямыми линиями с разными углами наклона, тогда как для баритовых флинтов (5 марок с плотностями от 3.36 до 3.67 г/см<sup>3</sup>) она явно не линейна. Более детально в работе рассмотрены только стекла кроновой группы.

Были рассчитаны МКОИ оксидов, используемых в производстве кроновых стекол, и на их основе получены значения ЛКОИ для широкой дополнительной номенклатуры стекол кроновой группы для излучений с энергией квантов из указанного выше диапазона. Было установлено, что оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  характеризуются сравнительно слабой зависимостью МКОИ от  $E$ , тогда как более “тяжелые” оксиды ( $\text{PbO}$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{CdO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) демонстрируют сильную зависимость МКОИ в диапазоне энергий от 0.2 до примерно 1.0 МэВ, а в области более высоких энергий квантов – близкую к таковой для базовых оксидов. Высказано предположение, что данные по МКОИ оксидов могут быть использованы для расчета значений ЛКОИ не только оптических стекол, но и оксидных оптических кристаллов или керамик на их основе.

Показано, что для излучений с  $E$ , равными 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 и 3.0 МэВ, значения ЛКОИ стекол кроновой группы хорошо укладываются на прямые линии в зависимости от плотности при ее изменении от 2.21 до 4.61 г/см<sup>3</sup>, углы наклона которых уменьшаются с ростом  $E$ . Выведены уравнения, описывающие эти прямые линии, позволяющие с хорошей точностью рассчитать неизвестные ЛКОИ стекол по их плотности.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арубузов В.И. Количественные характеристики ослабления рентгеновского и гамма-излучения оптическими стеклами // Оптический журнал. 2014. Т. 81, № 12. С. 46–55.
2. Отраслевой стандарт ОСТ 3-4888-80 “Стекло оптическое бесцветное. Синтетический состав”.
3. Отраслевой стандарт ОСТ 3-4391-81 “Стекло оптическое серии 100. Синтетический состав”.
4. Отраслевой стандарт ОСТ 3-1768-73 “Стекло оптическое серии 200 и Н. Синтетический состав”.
5. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. Справочник // М.: Атомиздат, 1973. 256 с.
6. Arbuzov V.I. Effect of the elemental composition of optical glasses on the quantitative characteristics of X-ray and gamma radiation attenuation // Glass Physics and Chemistry. 2024. Vol. 50, № 1. P. 10–16.