
УДК 535.343+54–77, 54–78

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СТЕКОЛ
НА МЕТОДОЛОГИЮ ИХ ПОДБОРА
ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ СМОТРОВЫХ
РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ОКОН**

© 2024 г. Арбузов В. И.

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
им. Главного маршала авиации А.А. Новикова
Россия, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38
e-mail: viarb@yandex.ru; kafedra5@bk.ru*

Поступила в редакцию 06.03.2024

После доработки 29.03.2024

Принята к публикации 16.04.2024

Предложена методология подбора стекол для конструирования смотровых радиационно-защитных окон (СРЗО) с высокой кратностью ослабления фотонного ионизирующего излучения, приемлемой пропускающей способностью и повышенным эффективным показателем преломления, в основе которой лежит учет влияния элементного состава стекол на их характеристики ослабления рентгеновского и гамма-излучения. Высказано предположение о целесообразности конструировать разные СРЗО для диапазонов энергий квантов высокоэнергетического ионизирующего излучения от 1.0 до 3.0 МэВ и от 0.2 до 1.0 МэВ. Предложено 2 приемлемых варианта СРЗО: кроново-флинтковый на основе пары стекол ТКН1 — ТФ200, чисто кроновый на базе стекла ТКН1.

Ключевые слова: смотровые радиационно-защитные окна, линейные коэффициенты ослабления фотонного ионизирующего излучения, кратность ослабления излучения, радиационно-оптическая устойчивость.

Коды OCIS: 160.4760, 350.5610

DOI: 10.31857/S0132665124020049, EDN: QYXSLL

ВВЕДЕНИЕ

Смотровые радиационно-защитные окна (СРЗО) находят широкое применение в атомной энергетике, в учреждениях Росатома [1–7]. Они защищают оператора, находящегося в «чистом» операторском зале, от вредного действия высокоэнергетического фотонного ионизирующего излучения (ВФИИ) «горячей» камеры и позволяют ему наблюдать за объектами в «горячей» камере и совершать над ними требуемые действия с помощью механического манипулятора. СРЗО могут применяться также в облучательных установках технического и медицинского назначения, машинах радиационно-химической разведки.

Стекла для конструирования СРЗО, разумеется, должны удовлетворять целому ряду требований.

Прежде всего, все типы стекол в составе СРЗО должны иметь высокое начальное светопропускание в видимой области спектра. В зависимости от активности излучения в «горячей» камере СРЗО должны обеспечивать кратность ослабления излучения вплоть до (10^5-10^6) , из-за чего суммарная толщина стеклоблоков может достигать 700 мм и даже более [2–6]. Поэтому для СРЗО следует выбирать стекла с максимально высокой радиационно-оптической устойчивостью (РОУ), то есть способностью сохранять приемлемую пропускающую способность в видимой области спектра в условиях радиационных нагрузок. Это означает, что стекла должны обладать минимальной интегральной (по всему видимому диапазону спектра) оптической плотностью наведенного радиацией поглощения, Δd , в образце толщиной в 1 см.

Далее, большое значение имеют радиационно-защитные свойства стекол для СРЗО, которые обеспечиваются максимально высокими значениями линейных коэффициентов ослабления (ЛКОИ) рентгеновского или гамма-излучения с той или иной энергией квантов E : защитные свойства стекла в составе СРЗО будут тем лучше, чем выше значения его ЛКОИ.

Наконец, эффективный показатель преломления, $n_{эф}$, всей сборки стекол должен быть максимально высоким, чтобы повысить угол обзора при наблюдении за объектами, находящимися слева или справа в «горячей» камере. Это требование можно было бы выполнить, если бы все типы стекол, входящих в сборку СРЗО, обладали высокими показателями преломления.

Обычно для изготовления СРЗО используют пластины из свинецсодержащих (например, ТФ105, Ф101, ТФ200) и бессвинцовых (как правило, К108 или К208) стекол, толщина которых чаще всего составляет 10 или 20 см. Такой выбор стекол для СРЗО обусловлен, прежде всего, тем, что все они принадлежат к радиационно-стойким стеклам, а также априорным представлением, что именно свинецсодержащие стекла (флинты) должны обеспечивать требуемую кратность ослабления излучения. При этом возникает естественный вопрос: а так ли оптимален названный набор стекол? Дело в том, что их защитные свойства определяются их элементным составом, точнее, значениями массовых коэффициентов ослабления излучения (МКОИ) атомами элементов, входящих в состав стекол, и зависимостью последних от энергии квантов, E , ВФИИ [8]. Поэтому представляется целесообразным провести анализ влияния элементного состава названных стекол на их значения ЛКОИ при разных E и на основе полученных результатов предложить методологию подбора таких стекол, которые удовлетворяли бы всем перечисленным выше требованиям.

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА СТЕКОЛ ДЛЯ СМОТРОВЫХ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫХ ОКОН

На первый взгляд, конструирование СРЗО с использованием кроновых стекол (К108 или К208) в сочетании с флинтowymi стеклами (ТФ105, Ф101, ТФ200) может показаться не совсем оправданным. В самом деле, известно, что и значения ЛКОИ, и показатели преломления флинтowych стекол обычно выше, чем у стекол кроновой группы [9], поэтому, казалось бы, СРЗО надо строить из радиационно-стойких флинтов. Этого не делают потому, что они гораздо сильнее окрашиваются под действием ионизирующего излучения, чем стекла кроновой группы [9–11]. Поэтому со стороны «горячей» камеры в СРЗО в зависимости от активности в ней ионизирующего излучения ставят радиационно-стойкое кроновое

стекло (чаще всего это K208 или K108) такой толщины, чтобы прошедшее через него ослабленное излучение уже не вызывало бы неприемлемой радиационной окраски флинтгов. Однако стекла K108 или K208, имея существенно более высокую РОУ, характеризуются более низкими значениями ЛКОИ по сравнению со стеклами флинтовой группы, из-за чего ухудшаются радиационно-защитные свойства СРЗО при лимитированной толщине стеклоблока. Кроме того, их использование приводит к снижению эффективного показателя преломления всей сборки стекол.

Отметим, что основными компонентами стекол кроновой и флинтовой групп, которые в принципе могут быть использованы в СРЗО, являются такие оксиды, как SiO_2 , B_2O_3 , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , CaO , ZnO , BaO и PbO [12–14]. Первые 5 из них — основа обычных кронов. В тяжелые кроны, кроме них, вводят дополнительно CaO , ZnO и BaO . Что же касается флинтгов, их состав очень простой: SiO_2 , K_2O и PbO (иногда с небольшими добавками BaO).

С учетом значений МКОИ элементов [8] и их массовых долей в указанных оксидах были определены значения их МКОИ для диапазона энергий ВФИИ от 0.2 до 3.0 МэВ (табл. 1). Сравнительный анализ данных этой таблицы показывает, что ход зависимостей МКОИ от энергии квантов ВФИИ, E , у всех оксидов, кроме BaO и PbO , с точностью до единиц процентов практически одинаковый, близкий к таковому для SiO_2 . Что же касается PbO , его значения МКОИ выше, чем для названных выше оксидов, во всем диапазоне энергий от 0.2 до 3.0 МэВ. У BaO при энергиях квантов от 0.2 до 0.5 МэВ значения МКОИ оказываются хоть и меньше, чем у PbO , но больше, чем у SiO_2 , B_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO и Al_2O_3 , а вот в диапазоне E от 0.5 до 3.0 МэВ они ниже, чем у перечисленных оксидов.

Данные табл. 1 представлены графически на рис. 1. Видно, что сильные различия в значениях МКОИ у SiO_2 (а значит, и у B_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO и Al_2O_3), BaO и PbO наблюдаются действительно только в диапазоне энергий квантов от 0.2 до примерно 1.0 МэВ, тогда как при более высоких энергиях квантов ВФИИ вплоть до 3.0 МэВ зависимости МКОИ всех оксидов практически одинаковы. Это означает, что при значениях E , лежащих в диапазоне от 1.0 до 3.0 МэВ, значения МКОИ кроновых стекол (на основе SiO_2 , B_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO и Al_2O_3) должны быть близки к таковым для стекол с BaO и PbO , т.е. для флинтговых стекол.

Таблица 1. МКОИ (μ/ρ , $\text{см}^2/\text{г}$) оксидов, используемых для производства стекол кроновой и флинтовой групп

E , МэВ	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
CaO	0,1278	0,1074	0,0958	0,0873	0,0805	0,0707	0,0636	0,0518	0,0449	0,0371
SiO ₂	0,1224	0,1060	0,0953	0,0868	0,0804	0,0706	0,0629	0,0517	0,0445	0,0362
Na ₂ O	0,1183	0,1030	0,0920	0,0841	0,0779	0,0685	0,0615	0,0503	0,0432	0,0351
B ₂ O ₃	0,1192	0,1035	0,0932	0,0847	0,0787	0,0691	0,0623	0,0505	0,0434	0,0349
ZnO	0,1445	0,1084	0,0928	0,0833	0,0765	0,0667	0,0598	0,0486	0,0426	0,0361
K ₂ O	0,1245	0,1052	0,0934	0,0851	0,0788	0,0690	0,0622	0,0507	0,0439	0,0364
Al ₂ O ₃	0,1205	0,1039	0,0935	0,0853	0,0789	0,0693	0,0624	0,0508	0,0437	0,0357
BaO	0,3438	0,1696	0,1174	0,0959	0,0807	0,0659	0,0573	0,0459	0,0407	0,0364
CeO ₂	0,3638	0,1744	0,1211	0,0970	0,0835	0,0677	0,0590	0,0471	0,0418	0,0372
PbO	0,9303	0,3500	0,2064	0,1455	0,1148	0,0836	0,0677	0,0508	0,0451	0,0412

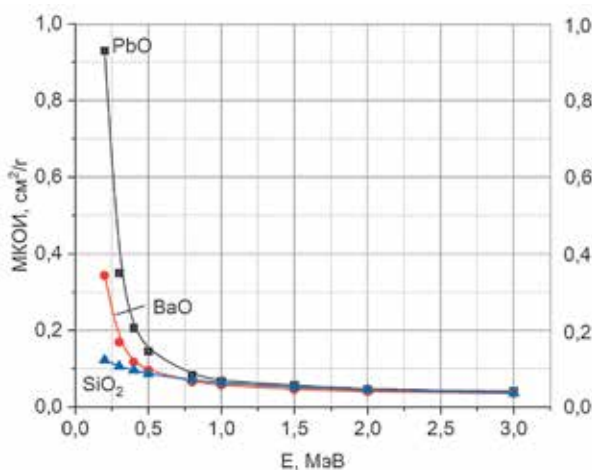


Рис. 1. Зависимость МКОИ оксидов кремния, бария и свинца от энергии квантов ВФИИ.

На рис. 2–4 представлены графики зависимостей ЛКОИ пар (или тройки, рис. 5) стекол флинтвой и кроновой групп от энергии квантов ВФИИ. Стекла для рис. 2–5 подбирались так, чтобы для каждого рисунка плотности стекол [15] в паре (тройке) были бы одинаковыми или различались не очень сильно, но менялись бы ступенчато при переходе от рис. 2 к рис. 5. Были выбраны следующие флинтво-кроновые пары: ЛФ5 (3.23 г/см³) и ТК2 (3.20 г/см³); Ф1 (3.57 г/см³) и ТК16 (3.57 г/см³); Ф4 (3.67 г/см³) и ТК20 (3.58 г/см³); ТФ3 (4.46 г/см³), ТФ1 (3.867 г/см³) и СТК 19 (4.097 г/см³). В последнем случае тяжелые флинты были подобраны так, чтобы усредненная по их данным плотность (4.16 г/см³) была максимально близка к плотности стекла ТК16 (4.097 г/см³) или его радиационно-стойких аналогов ТК116 или ТК216.

Как следует из рис. 2–5, ход зависимостей ЛКОИ стекол от энергии квантов ВФИИ в области, превышающей примерно 1.25 МэВ (1.5 МэВ для тройки стекол

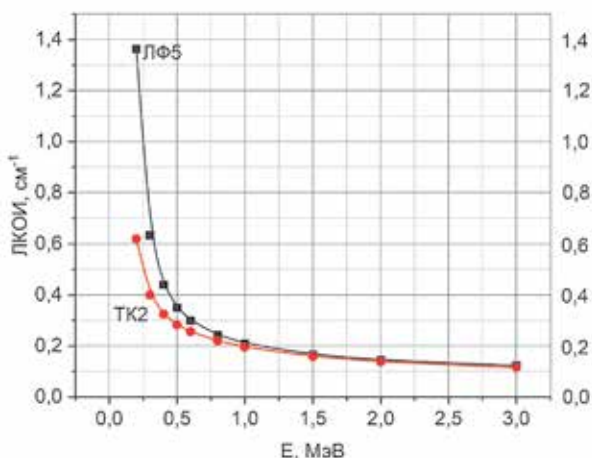


Рис. 2. Зависимость ЛКОИ стекол ЛФ5 и ТК2 от энергии квантов ВФИИ.

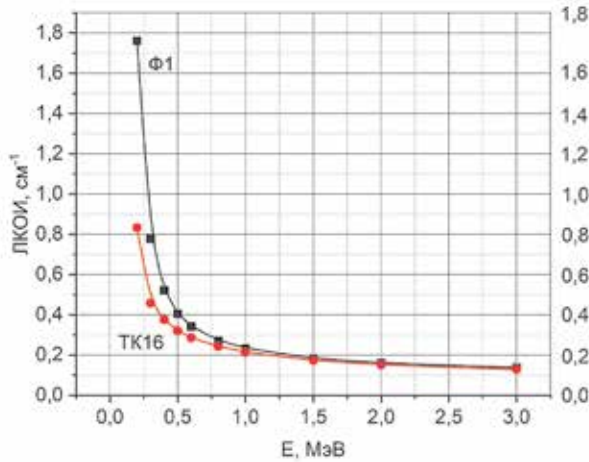


Рис. 3. Зависимость ЛКОИ стекол Ф1 и ТК16 от энергии квантов ВФИИ.

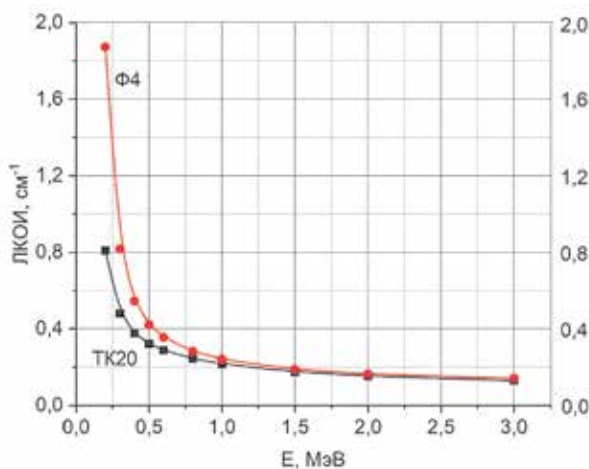


Рис. 4. Зависимость ЛКОИ стекол Ф4 и ТК20 от энергии квантов ВФИИ.

ТФ1, ТФ3 и СТК19), практически совпадает. А вот в более низкоэнергетической области значения ЛКОИ сильно возрастают с уменьшением E , причем тем значительнее, чем выше плотность стекол. При этом возрастание ЛКОИ у флинт-овых стекол выражено значительно сильнее, чем у стекол кроновой группы. Эти данные убедительно свидетельствуют о том, что в области энергий квантов, превышающих приблизительно 1.0 МэВ, не следует рассчитывать на то, что флинт-овые стекла будут эффективнее ослаблять излучение, чем стекла кроновой группы с близкой плотностью. Поэтому для того, чтобы кроновое стекло на входе СРЗО достаточно сильно ослабило излучение, надо выбирать стекло с более высокой плотностью, чем у стекол К208 или К108, плотности которых равны 2.51 и 2.52 г/см³ соответственно. Разумеется, выбор кроновых стекол должен проводиться с учетом их РОУ [9–11]. С этой точки зрения, казалось бы, могли подойти стекла ТКН1 (3.63 г/см³) и ТК216 (3.56 г/см³) при высоких радиационных нагрузках, а при умеренных — ТК116 (3.52 г/см³) или ТК120 (3.58 г/см³), у которых

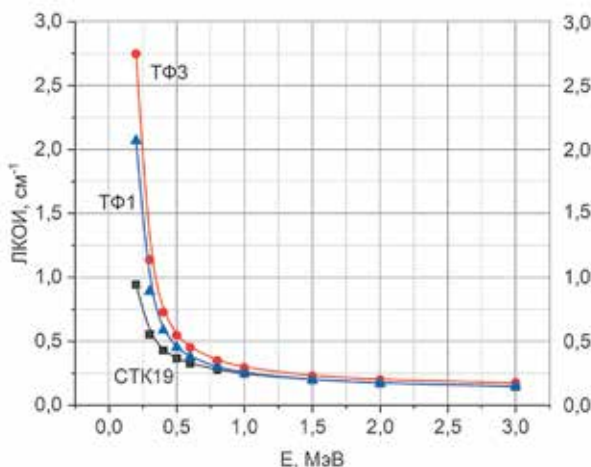


Рис. 5. Зависимость ЛКОИ стекол ТФ3, ТФ1 и СТК19 от энергии квантов ВФИИ.

плотность более чем на 1.0 г/см^3 превышает таковую стекол К208 (К108). Однако стекла ТК116 и ТК120 сильно уступают стеклам ТКН1 и ТК216 по РОУ [10, 11]. Поскольку кратности ослабления излучения у СРЗО обычно бывают очень высокими (10^5 – 10^6), более предпочтительными по РОУ представляются стекла К208, ТКН1 и ТК216.

Однако кроме стекол К208, ТКН1 и ТК216 каталог стекол серий 200 и Н содержит 2 стекла типа БК (БК200 и БК210), которые по своим сравнительно низким значениям показателя преломления (1.562 и 1.572) не лучше стекла К208 (1.518) [16]. Кроме того, они заметно уступают трем оставшимся кроновым стеклам — К208, ТКН1 и ТК216 — по РОУ [11, 16]. Поэтому рассмотрим только 3 стекла из названного каталога: К208, ТКН1 и ТК216. Рассчитаем их толщины, при которых обеспечивалось бы ослабление дозы излучения в 100 раз. Само ослабление ВФИИ пластиной стекла толщиной l описывается экспоненциальной функцией:

$$Q_l = Q_0 \cdot \exp(-\mu(E)l), \quad (1)$$

где Q_0 и Q_l — экспозиционные дозы, регистрируемые до и после пластины стекла, а $\mu(E)$ — это его ЛКОИ для ВФИИ с энергией квантов, равной E . Отсюда можно легко получить уравнения для кратности ослабления излучения в 100 раз:

$$K_2 = 10^2 = Q_0/Q_l = \exp(\mu l_2) \quad (2)$$

и толщины стекла для ослабления излучения в 100 раз:

$$l_2 = \ln(Q_0/Q_l)/\mu(E) = 4,605/\mu(E). \quad (3)$$

Подберем флинтвые стекла в пары к названным кроновым стеклам. В качестве критериев для этого выберем данные по их РОУ, значения их ЛКОИ и показателей преломления. По РОУ (в порядке ее уменьшения) получим следующий ряд: ТФ200–ТФ107–Ф108–ТФ105 [1, 8]. Тогда при суммарной кратности ослабления излучения смотровым радиационно-защитным окном в 10^5 на эти флинтвые стекла достанется кратность $K_3 = 10^3$, а значит, их толщины могут быть рассчитаны по формуле:

$$l_3 = 6.908/\mu(E).$$
(4)

Если же требуемая суммарная кратность ослабления излучения должна быть равна 10^6 , то флинтовые стекла должны обеспечить $K_4 = 10^4$ при толщинах:

$$l_4 = 9.210/\mu(E).$$
(5)

В табл. 2 представлены все параметры, на основе которых можно подбирать стекла для СРЗО. Что касается РОУ стекол К208, ТКН1 и ТК216, для них указаны значения радиационно-индуцированного приращения оптической плотности, Δd ,

Таблица 2. Характеристики стекол для кроново-флинтowych СРЗО, по данным [9–11]

Е, МэВ	К208		ТКН1		ТК216		ТФ200		ТФ107*)	
	μ , см ⁻¹	l_2 , см	μ , см ⁻¹	l_2 , см	μ , см ⁻¹	l_2 , см	μ , см ⁻¹	l_3/l_4 , см	μ , см ⁻¹	l_3/l_4 , см
0,2	0,3178	14,50	0,8543	5,39	0,8168	6,70	2,0314	3,50/4,50		/
0,3	0,2678	17,20	0,4963	9,28	0,4783	9,60	0,8774	7,90/10,50	1,1551	6,00/8,00
0,4	0,2383	19,30	0,3835	12,00	0,3711	12,40	0,5786	12,00/15,90	0,7382	9,40/12,50
0,5	0,2169	21,20	0,3266	14,10	0,3166	14,60	0,4452	15,50/20,70	0,5550	12,50/16,60
0,6	0,2005	23,00	0,2913	15,81	0,2827	16,30	0,3729	18,50/24,70	0,4514	15,30/20,40
0,8	0,1757	26,20	0,2470	18,64	0,2399	19,20	0,2937	23,50/31,40	0,3541	19,50/26,00
1,0	0,1579	29,20	0,2186	21,07	0,2125	21,70	0,2506	27,50/36,80	0,2970	23,30/31,00
1,5	0,1286	35,80	0,1766	26,08	0,1716	26,80	0,1959	36,30/47,00	0,2312	29,90/39,90
2,0	0,1108	41,60	0,1544	29,83	0,1498	30,80	0,1712	40,40/53,80	0,2033	34,00/45,40
3,0	0,0908	50,70	0,1319	34,91	0,1275	36,10	0,1406	49,10/65,50		/
n_e	1,518		1,613		1,617		1,649		1,734	
Δd	<< 0,001 (10^5 Р)		<< 0,001 (10^5 Р)		< 0,004 (10^5 Р)		0,000 (10^3 Р)		0,000 (10^3 Р)	
Δd	0,002 (10^6 Р)		0,002 (10^6 Р)		0,008 (10^6 Р)		0,000 (10^4 Р)		0,008 (10^4 Р)	
T_i/T_0 (1,5)	> 0,920 (10^5 Р)		> 0,920 (10^5 Р)		> 0,781 (10^5 Р) (!)		1,00 (10^3 Р)		1,00 (10^3 Р)	
T_i/T_0 (1,5)	0,848 (10^6 Р)		0,848 (10^6 Р)		0,610 (10^6 Р) (!)		1,00 (10^4 Р)		0,480 (10^4 Р) (!)	

*)Значения ЛКОИ рассчитаны в настоящей работе.

Таблица 3. РОУ (Δd) флинтow, по данным [10–12]

Доза, Р	ТФ107	Ф108	ТФ105	ТФ200
10^4	0,008	0,009	0,011	0,000
$3 \cdot 10^4$	0,010	0,022	0,033	0,000
$5 \cdot 10^4$	0,014	0,024	0,039	< 0,001
10^5	0,038	0,057	0,088	< 0,003
$5 \cdot 10^5$	0,085	0,167	0,228	0,010
10^6	0,100	0,204	0,285	0,013

стекло толщиной в 1 см для доз в 10^5 и 10^6 Р. Значит, на флинтовые стекла при-
дуются дозы в 10^3 и 10^4 Р, при которых значения Δd можно считать равными или
близкими к нулю соответственно (см. табл. 3).

Данные табл. 3 убедительно говорят о том, что из всех четырех названных
выше флинтовых стекол наиболее предпочтительными являются стекла ТФ200
и ТФ107. Так, при дозе в $5 \cdot 10^5$ Р приращение оптической плотности стекла ТФ200
равно всего 0.010 [11, 16], а стекло ТФ107 сохраняет приемлемую пропускающую
способность (когда снижение пропускающей способности $\Delta T \leq 10\%$, а радиаци-
онно-стимулированное приращение оптической плотности $\Delta d \leq 0.045$ при дозах
вплоть до 10^5 Р) [1, 10]. У стекол Ф108 и ТФ105 эти характеристики заметно хуже.

Если же сравнивать три кроновых стекла К208, ТКН1 и ТК216 из каталога
«200 и Н», то придется признать, что первое и второе незначительно превосходит
третье по РОУ, зато у ТКН1 и ТК216 более высокие значения показателя прелом-
ления (1.613 и 1.617 соответственно), чем у первого (1.518) [16]. Поэтому представ-
ляется совершенно оправданным для создания кроново-флинтовых СРЗО с улуч-
шенной пропускающей способностью, повышенным эффективным показателем
преломления и высокой РОУ выбрать такие пары стекол, как ТК216–ТФ200,
ТК216–ТФ107, ТКН1–ТФ200 и ТКН1–ТФ107.

Чтобы выбрать наиболее приемлемый вариант из всех представленных пар
стекол, проанализируем более детально табл. 2, в которой, кроме данных для сте-
кол ТКН1, ТК216, ТФ200 и ТФ107, представлены для сравнения и данные для
стекала К208. Для всех кроновых стекол с учетом значений их ЛКОИ при разных
энергиях квантов были рассчитаны значения их толщин, l_2 , при которых назван-
ные стекла обеспечивают кратность ослабления излучения в 10^2 раз. Поэтому при
кратностях ослабления излучения парами стекол в 10^5 или 10^6 раз для флинтовых
стекол приводятся значения их толщин l_3 и l_4 при оставшихся дозах в 10^3 и 10^4 Р.

В табл. 2 приводятся также данные по приращению оптической плотности на-
веденного радиацией поглощения, Δd , для образцов стекол толщиной в 1 см при
дозах 10^5 и 10^6 Р для кроновых стекол и при 10^3 и 10^4 Р для флинтовых стекол. На-
конец, эта таблица содержит данные об изменении пропускающей способности
стекол после облучения гамма-квантами с энергией квантов в 1.5 МэВ, T_0/T_1 (1.5)
(данные в таблице набраны жирным шрифтом), при превышении которой, как
видно из рис. 1–5, кроновые и флинтовые стекла демонстрируют практически
одинаковый ход энергетической зависимости ЛКОИ. T_0 – пропускающая способ-
ность стекол толщиной l до их облучения, а T_1 – после облучения. Сама же про-
пускающая способность стекол рассчитывалась по формуле:

$$T_l = 10^{-l\Delta d}, \quad (4)$$

где произведение $l\Delta d = \Delta d_l$ представляет собой приращение наведенного по-
глощения образца стекла толщиной l (в табл. 2 значения l взяты для ВФИИ
с $E = 1.5$ МэВ).

Как следует из табл. 2, по РОУ два стекла К208 и ТКН1 практически одинако-
вы, но показатель преломления у стекла ТКН1 заметно выше, чем у стекла К208.
Поэтому стекло ТКН1 предпочтительнее стекла К208 для использования в СРЗО.
Стекло ТК216, у которого РОУ уступает таковой стекла ТКН1, также не может
быть рекомендовано для конструирования СРЗО с большими кратностями ослаб-
ления излучения. Если же сравнить аналогичные данные для флинтовых стекол,

представленных в табл. 2, то можно с уверенностью сказать, что предпочтение следует отдать стеклу ТФ200.

В итоге мы приходим к выводу, что строить кроново-флинтовые СРЗО следует из стекол ТКН1 и ТФ200. Как видно из табл. 2, суммарная толщина стекол СРЗО для защиты от излучения с энергией квантов, равной 1.5 МэВ, будет складываться из **26.08** см стекла ТКН1 и **47.00** см стекла ТФ200 (суммарно 73.08 см) для СРЗО с кратностью ослабления $K = 10^6$ и из **26.08** см стекла ТКН1 и **36.30** см стекла ТФ200 (суммарно 62.38 см) при $K = 10^5$. Понятно, что для ВФИИ с меньшими энергиями квантов суммарные толщины стекол кроново-флинтовых СРЗО будут меньше, чем для случая с $E = 1.5$ МэВ, а при $E > 1.5$ МэВ — немного больше указанных выше значений.

Но возникает вопрос о том, можно ли обеспечить требуемые кратности ослабления ВФИИ с помощью СРЗО, построенных только из пластин стекол ТКН1 или ТФ200. Понятно, что при этом надо рассмотреть случаи кратностей ослабления, равных 10^6 и 10^5 . Толщины стекол l_6 и l_5 будут рассчитываться по формулам:

$$l_6 = \ln 10^6 / \mu(E) = 13.82 / \mu(E), \quad (5)$$

$$l_5 = \ln 10^5 / \mu(E) = 11.51 / \mu(E). \quad (6)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 4. Как видно из этой таблицы, для ВФИИ с $E = 1.5$ МэВ при указанных выше кратностях ослабления излучения суммарная толщина пластин стекла ТКН1 равна 78.26 и 65.18 см, а суммарная толщина пластин стекла ТФ200 — 70.55 и 58.75 см соответственно. Эти значения для случая СРЗО из стекла ТКН1 оказываются выше, а для СРЗО из стекла ТФ200 — ниже названной выше суммарной толщины пластин кроново-флинтового СРЗО.

Таблица 4. Характеристики стекол для чисто кроновых или флинтовых СРЗО, по данным [9–11]

E, МэВ	ТКН1			ТФ200		
	μ , см ⁻¹	l_6 , см	l_5 , см	μ , см ⁻¹	l_6 , см	l_5 , см
0,2	0,8543	16,18	13,47	2,0314	6,80	5,67
0,3	0,4963	27,85	23,19	0,8774	15,75	13,12
0,4	0,3835	36,04	30,01	0,5786	23,89	19,89
0,5	0,3266	42,31	35,24	0,4452	31,04	25,85
0,6	0,2913	47,44	39,51	0,3729	37,06	30,87
0,8	0,2470	55,95	46,60	0,2937	47,05	39,19
1,0	0,2186	63,22	52,65	0,2506	55,15	45,93
1,5	0,1766	78,26	65,18	0,1959	70,55	58,75
2,0	0,1544	89,51	75,55	0,1712	80,72	67,23
3,0	0,1319	104,78	87,26	0,1406	93,13	77,56
n_e	1,613			1,617		
Δd	<< 0,001 (10^5 P)			<< 0,001 (10^5 P)		
Δd	0,002 (10^6 P)			0,013 (10^6 P)		
$T_l/T_0(1,5)$	> 0,920 (10^5 P)			> 0,920 (10^5 P)		
$T_l/T_0(1,5)$	0,848 (10^6 P)			0,121 (10^6 P) (!)		

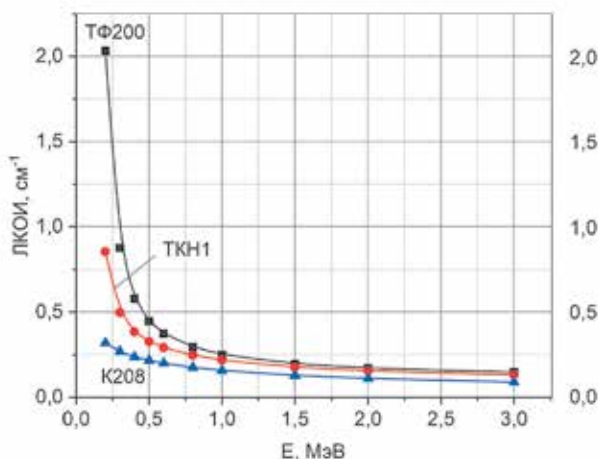


Рис. 6. Зависимость ЛКОИ стекол ТФ200, ТКН1 и К208 от энергии квантов ВФИИ.

Казалось бы, следует остановиться на чисто флинтовом СРЗО, и такой вариант можно рассматривать приемлемым при дозе в 10^5 Р, поскольку такое СРЗО характеризуется достаточно малым снижением пропускающей способности (> 0.920 , как и для стекла ТКН1). Однако, как это следует из табл. 4, при дозе в 10^6 Р пропускающая способность сборки пластин из стекла ТФ200 оказывается очень низкой (0.121). Поэтому остается 2 приемлемых варианта СРЗО: либо кроново-флинтвый (ТКН1–ТФ200), либо чисто кроновый (ТКН1).

Понятно, что указанные значения не учитывают потерь света на френелевское отражение от границ раздела сред «воздух — стекло» и «стекло — воздух» при прохождении через каждую пластину стекла. Эти потери можно уменьшить, во-первых, за счет увеличения толщины пластин стекол, а во-вторых, что может оказаться гораздо более эффективным, — заполнением воздушных промежутков между пластинами либо иммерсионной жидкостью на основе смеси диметилсульфоксида, нитрата свинца и воды с добавками и без добавок формамида [7, 17] либо даже просто дистиллированной водой.

На рис. 6 представлены графики зависимостей ЛКОИ стекол ТФ200 и ТКН1 от энергии квантов ВФИИ. Для сравнения приведен также аналогичный график и для стекла К208. Видно, что стекло К208 заметно уступает стеклу ТКН1 по значениям ЛКОИ во всем диапазоне E от 0.2 до 3.0 МэВ.

Анализ рис. 1–6, а также табл. 2, 4 убедительно говорит о том, что для всех стекол, а особенно для стекол флинтовой группы, значения ЛКОИ очень сильно изменяются при варьировании энергий квантов ВФИИ во всем диапазоне от 0.2 до 3.0 МэВ. Это означает, что не совсем оправданно эксплуатировать одно и то же СРЗО для ослабления излучения со всеми названными значениями E . В самом деле, в низкоэнергетической области, где высоки значения ЛКОИ стекол, требуются существенно меньшие толщины стекол для обеспечения требуемых значений кратности ослабления излучения смотровым окном, чем в области от 1.0 до 3.0 МэВ. Поэтому целесообразно рекомендовать один тип СРЗО с большими толщинами пластин стекол для ослабления ВФИИ в диапазоне энергий квантов от примерно 1.0 до 3.0 МэВ и другой тип СРЗО с пластинами стекол сравнительно малой толщины — для ослабления ВФИИ с E от 0.2 до 1.0 МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ требований к радиационно-стойким стеклам для конструирования смотровых радиационно-защитных окон (СРЗО) с высокими значениями кратности ослабления рентгеновского и гамма-излучения, радиационно-оптической устойчивости, пропускающей способности при высоких радиационных нагрузках, эффективного показателя преломления всей сборки пластин стекол СРЗО.

Выбраны радиационно-стойкие стекла, функционально значимые свойства которых удовлетворяют всем или некоторым из перечисленных требований, и оценена возможность их использования для построения СРЗО.

На основе литературных данных о составах стекол и о значениях массовых коэффициентов ослабления (МКОИ) рентгеновского и гамма-излучения химических элементов, входящих в состав стекол, рассчитаны значения МКОИ оксидов — основных компонентов оксидных стекол, на основе которых получены значения линейных коэффициентов ослабления (ЛКОИ) названных видов ионизирующего излучения для диапазона энергий квантов от 0.2 до 3.0 МэВ.

Установлено, что значения ЛКОИ стекол с оксидами бария и особенно свинца в их составе (флинты), в отличие от ЛКОИ стекол без этих оксидов (кроны), очень сильно изменяются при варьировании энергий квантов излучения от 0.2 до примерно 1.0 МэВ, тогда как в диапазоне энергий от 1.0 до 3.0 МэВ энергетические зависимости ЛКОИ стекол кроновой и флинтовой групп оказываются практически одинаковыми.

Предложено 2 приемлемых варианта конструкции СРЗО: либо кроново-флинтный (на основе пары стекол ТКН1–ТФ200), либо чисто кроновый (на базе стекла ТКН1).

Высказано мнение о нецелесообразности эксплуатировать одно и то же СРЗО для ослабления излучения во всем диапазоне энергий квантов от 0.2 до 3.0 МэВ. Дана рекомендация конструировать 2 разных типа СРЗО: первый — с большими толщинами пластин стекол для ослабления излучения в диапазоне энергий квантов от примерно 1.0 до 3.0 МэВ; второй — с пластинами стекол сравнительно малой толщины для ослабления фотонного ионизирующего излучения с энергиями квантов от 0.2 до 1.0 МэВ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов В. И. Основы радиационного оптического материаловедения // СПб: Изд. СПб ГУИТМО, 2008. 284 с.
2. *Отраслевой стандарт* ОСТ 95.234-74 «Камеры радиационно-защитные. Типы. Основные параметры и размеры».
3. *ГОСТ* 23410–78 «Окна защитных боксов. Типы, конструкция и размеры».
4. *Отраслевой стандарт* ОСТ 95.918-81 «Камеры и боксы. Окна смотровые защитные от гамма-излучения прямоугольные крупногабаритные. Типы, конструкция и размеры».
5. *Отраслевой стандарт* ОСТ 95.23-83 «Окна смотровые радиационно-защитные от гамма-излучения, прямоугольные. Типы, конструкция и размеры».

6. *Отраслевой стандарт* ОСТ 95.821-87 «Окна смотровые прямоугольные радиационно-защитные от смешанного (гамма-нейтронного) излучения. Типы».
7. *Арбузов В. И., Божко А. Г., Волынкин В. М., Косьяненко В. А., Кузнецов С. Ю., Трохов Н. Н., Федоров Ю. К.* Смотровое радиационно-защитное окно // Патент на изобретение № 2352007. Заявка № 2007135306. Приоритет изобретения 25 сентября 2007 г. Зарегистрировано в Госреестре изобретений Российской Федерации 10.04.2009.
8. *Сторм Э., Израэль Х.* Сечения взаимодействия гамма-излучения: Справочник // Москва: Атомиздат, 1973. 256 с.
9. *Арбузов В. И.* Количественные характеристики ослабления рентгеновского и гамма-излучения оптическими стеклами // *Оптический журнал*. 2014. Т. 81. № 12. С. 46–55.
10. *Руководящий* технический материал РТМ 3-48-70 «Стекло оптическое серии 100. Радиационно-оптическая устойчивость к гамма-излучению».
11. *Отраслевой стандарт* ОСТ 3-51-70 «Стекло оптическое серии 200 и Н. Радиационно-оптическая устойчивость».
12. *Отраслевой стандарт* ОСТ 3-4888-89 «Стекло оптическое бесцветное. Синтетический состав».
13. *Отраслевой стандарт* ОСТ 3-4931-81 «Стекло оптическое серии 100. Синтетический состав».
14. *Отраслевой стандарт* ОСТ 3-1768-73 «Стекло оптическое серии 200 и серии Н. Синтетический состав».
15. *Бесцветное* оптическое стекло СССР: Каталог / Под ред. Г. Т. Петровского. М.: Дом оптики, 1990. 132 с.
16. *Отраслевой стандарт* 3-3677-77 «Стекло оптическое серий 200 и Н. Технические условия».
17. *Арбузов В. И., Волынкин В. М.* Иммерсионная жидкость для смотровых радиационно-защитных окон // Сборник трудов XI Междунар. конф-ции «Прикладная оптика — 2014». Том 3. С. 56–59.