

УДК: 575.317: 681.7.066.6

DOI: 10.53816/23061456_2022_1-2_133

**ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ПРОПУСКАНИЯ БРОНЕВЫХ СТЕКОЛ КЛАССА ЗАЩИТЫ 3ХЛ ОТ ВРЕМЕНИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

**DEPENDENCE OF THE CHANGING OF SPECTRAL TRANSMISSION
COEFFICIENT OF ARMORED GLASSES OF THE 3RD CLASS PROTECTION
ON THEIR OPERATING TIME IN NEAR-INFRARED**

*Б.Н. Добряков¹, канд. техн. наук Ю.Ю. Меркулов¹,
д-р техн. наук С.В. Солк¹, канд. техн. наук Н.М. Сильников²*

B.N. Dobryakov, Ph.D. Yu.Yu. Merkulov, D.Sc. S.V. Solk, Ph.D. N.M. Silnikov

¹АО «НИИ ОЭП», ²АО «НПО Спецматериалов»

В статье рассматриваются защитные (броневые) стекла, изготовленные с разницей в один год в период с 2014 по 2017 год, включительно, и пронумерованные в соответствии с порядком их изготовления. Проводились измерения оптических характеристик защитных стекол в ближнем инфракрасном диапазоне от 800 до 1000 нм. Приведен принцип работы установки по выполнению оптических измерений испытуемых образцов защитных стекол. Описана методика измерений спектрального коэффициента пропускания стекол 3-го класса защиты. Представлены результаты измерений спектрального коэффициента пропускания испытуемых образцов в ближнем инфракрасном диапазоне с использованием источников лазерного излучения на длинах волн 808, 830, 850, 940 и 980 нм. Проведена оценка результатов оптических измерений на основе анализа численных данных с последующим построением графических представлений. Сформулированы соответствующие выводы по проделанной работе.

Ключевые слова: защитные (броневые) стекла, оптические измерения, коэффициент пропускания.

The armored glasses made with a difference of one year in the period from 2014 to 2017, inclusively, and numbered in accordance with the order of their manufacture are examined in the paper. Measurements of the optical properties of armored glasses in near-IR from 800 to 1000 nm were carried out. The principle of operation of the installation for optical measurements of the tested samples of armored glasses is given. The method of measuring the spectral transmission coefficient of armored glasses of the 3rd class protection are described. The results of measurements of the spectral transmittance of the tested samples in the near-IR using laser sources at wavelengths of 808, 830, 850, 940 and 980 nm are presented. The results of optical measurements were evaluated based on the analysis of numerical data with subsequent graphical representation. Corresponding conclusions on the work done are formulated.

Keywords: armored glass, optical measurements, transmission coefficient.

В ранних исследованиях зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол на основе образцов класса защиты ЗХЛ от времени их эксплуатации были проведены измерения в видимом диапазоне от 405 до 635 нм. Вместе с тем, используя источник лазерного излучения с длиной волны 808 нм, оказалось возможным расширить спектральный диапазон измерений [1]. Было выявлено, что наиболее заметные участки изменения пропускания отмечаются в областях от ближнего УФ-излучения до синей области спектра, а также в диапазоне от красной области спектра до коротковолновой части ближнего ИК диапазона. В виду того, что оптическое стекло и стекло листовое бесцветное [2, 11] не имеют поглощения в ближней ИК области спектра, а также в виду наличия в широком доступе продаж лазерных источников излучения, работающих в данной области спектра, были проведены измерения на длинах волн 808, 830, 850, 940 и 980 нм.

В работе рассмотрены образцы класса защиты ЗХЛ, вырезанные из стекол, изготовленных по ГОСТ Р51136–2008 [3]. Данные образцы изготовлены с разницей в один год в пери-

од с 2014 по 2017 год, включительно. Образцы имеют специальную нумерацию по списку стекол, предоставленных АО «НПО Спецматериалов» (рис. 1).

Оптические измерения проводились на территории АО «НИИ ОЭП». Принципиальная схема измерительной установки отображена на рис. 2. Излучение, исходящее из лазерной установки (поз. 1, рис. 2), проходит через образец (поз. 2, рис. 2), установленный на столике с регулируемой высотой (поз. 3, рис. 2). Претерпевая многократное отражение от рабочих поверхностей слоев стекла [4], далее излучение попадает на чувствительную площадку измерительной головки (поз. 4, рис. 2). При помощи измерительной панели (поз. 5, рис. 2) регистрируется энергетический поток излучения, прошедший через испытуемый образец. Энергетический поток излучения лазерной установки регистрируется без образца с учетом времени стабилизации потока для обеспечения повышенной точности измерений.

Измерительная установка на примере источника с лазерным излучением в видимом диапазоне показана на рис. 3.

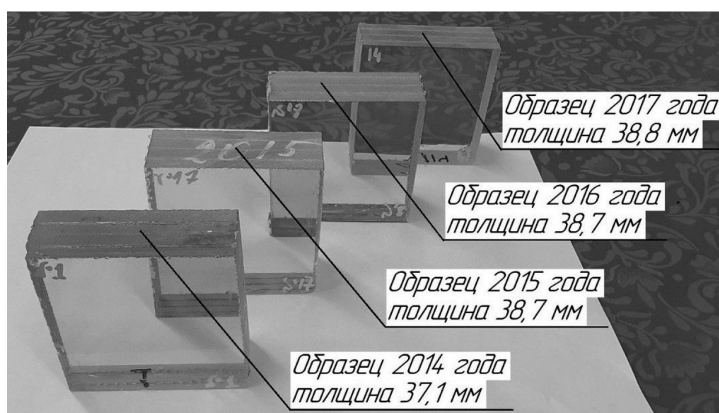


Рис. 1. Испытуемые образцы броневых стекол. Подготовлены в АО «НПО Спецматериалов»

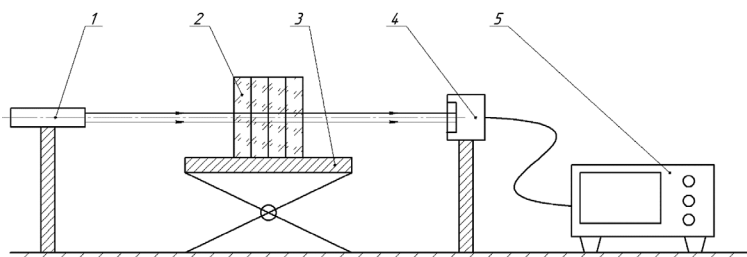


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной установки: 1 — лазерная установка; 2 — образец; 3 — столик с регулируемой высотой; 4 — измерительная головка; 5 — измерительная панель

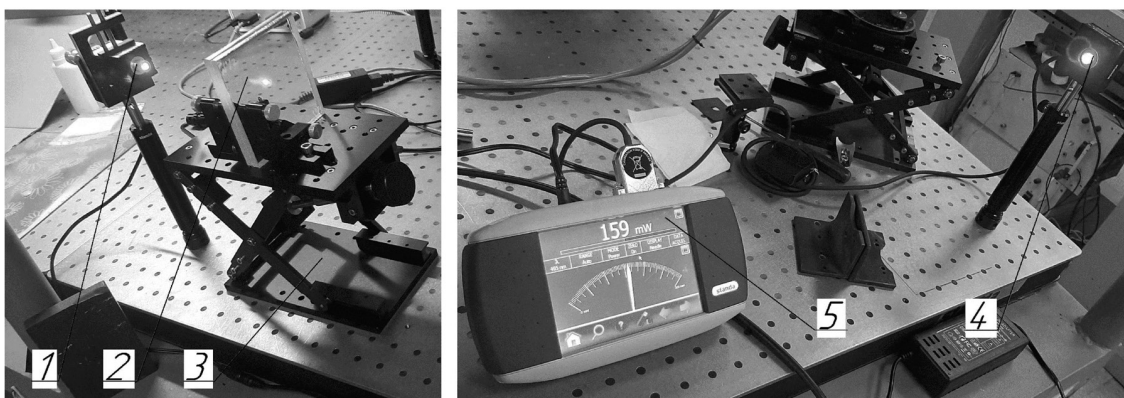


Рис. 3. Схема измерительной установки: 1 — лазерный источник излучения; 2 — испытуемый образец; 3 — регулируемый подъемный стол; 4 — измерительная головка детектора; 5 — измерительная панель

Установка образцов осуществлялась поочередно по дате производства. Продолжительность измерений с образцом и без образца составляла не менее 1 минуты по достижении максимальной стабилизации интенсивности (светового потока) лазерного излучения (табл. 1). Оптические измерения проводились в лабораторных помещениях 2-й категории при температуре 18–23 °С, относительной влажности 45–30 % [5] в августе 2021 года. Длина оптической трассы составляла не более 0,7 метров, влияние атмосферных изменений оценено как пренебрежительно малое. Данная методика проведения измерений была предложена в работе [6].

Результаты измерений на основе показаний измерительной панели обрабатывались посредством программы Microsoft Excel. Количество измерений $n=5$. По формуле

$$\overline{\Phi}'_{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi'_{\lambda}}{n}$$

усреднялись значения энергетического потока прошедшего через образцы излучения Φ'_{λ} , МВт. После чего были вычислены значения спектрального коэффициента пропускания τ_{λ} ,

$$\tau_{\lambda} = \frac{\overline{\Phi}'_{\lambda}}{\Phi_{\lambda}}$$

как соотношение энергетических потоков усредненного $\overline{\Phi}'_{\lambda}$, МВт, к потоку излучения Φ_{λ} , МВт, для каждого из образцов [7].

Далее были вычислены разностные величины изменения спектрального коэффициента пропускания по мере сравнения образцов по датам их изготовления. Изменение спектрального коэффициента пропускания в течение 1-го года считалось, как разница значений $\tau_{\lambda,2014} - \tau_{\lambda,2015}$, $\tau_{\lambda,2015} - \tau_{\lambda,2016}$, $\tau_{\lambda,2016} - \tau_{\lambda,2017}$, соответственно, изменение в течение 2-х лет, как $\tau_{\lambda,2014} - \tau_{\lambda,2016}$, $\tau_{\lambda,2015} - \tau_{\lambda,2017}$, изменение в течение 3-х лет, как $\tau_{\lambda,2014} - \tau_{\lambda,2017}$. Также, для трех значений изменения спектрального коэффициента пропускания в течение 1-го года и двух значений по измене-

Таблица 1

Среднеквадратическое значение величины стабилизации энергетического потока лазерного ИК излучения при работе в течение 1 минуты

| Длина волны λ , нм | Энергетический поток Φ_{λ} , МВт | Среднеквадратическое значение стабилизации энергетического потока излучения WRMS, % |
|-------------------------------|--|---|
| 808 | 177 | 0,62 |
| 830 | 164 | 0,73 |
| 850 | 169 | 0,75 |
| 940 | 167 | 0,73 |
| 980 | 117 | 0,51 |

нию в течение 2-х лет вычислено среднее арифметическое значение. Результаты представлены в табл. 2.

По данным табл. 2 составлены диаграммы, показанные на рис. 4, 5. Как видно на рис. 4, при разнице в 1 и 2 года изменение коэффициента пропускания испытуемых образцов в данном спектральном диапазоне имеет небольшой разброс величин при описании линейной аппроксимации кривых, при этом разница в 3 года отмечается кривой с явно выраженными минимумом на длине волны 808 нм, и максимумом на длине волны 980 нм. Авторами данной статьи высказывается предположение о селективности прозрачных клеев к потоку оптического излучения в ближнем ИК диапазоне. Не исключается и влияние ошибок измерений вследствие отно-

сительно высокого процента нестабильности лазерного излучения во время измерений (табл. 1). Суммарная погрешность измерений энергетического потока лазерного излучения и потока, прошедшего через образцы, не превышает 2 %. Величина изменения спектрального коэффициента пропускания определена с суммарной погрешностью не более 2 % от номинальной расчетной величины.

Как показано на рис. 5, характер изменения спектрального коэффициента пропускания для всех представленных в работе длин волн примерно одинаков и отличается небольшими отклонениями от линейной зависимости изменения спектрального пропускания от времени эксплуатации. Аналогичный характер кривых был выявлен в работе [1] для

Таблица 2

Зависимость изменения спектрального коэффициента пропускания в ближней ИК области от времени эксплуатации

| Длина волны λ , нм | Изменение спектрального коэффициента пропускания $\Delta\tau_\lambda$, % | | |
|-------------------------------|---|-------|-------|
| | время эксплуатации T , лет | | |
| | 1 | 2 | 3 |
| 808 | -1,93 | -3,12 | -5,78 |
| 830 | -1,75 | -3,05 | -5,25 |
| 850 | -1,72 | -3,03 | -5,17 |
| 940 | -1,66 | -2,72 | -4,98 |
| 980 | -1,51 | -2,51 | -4,53 |

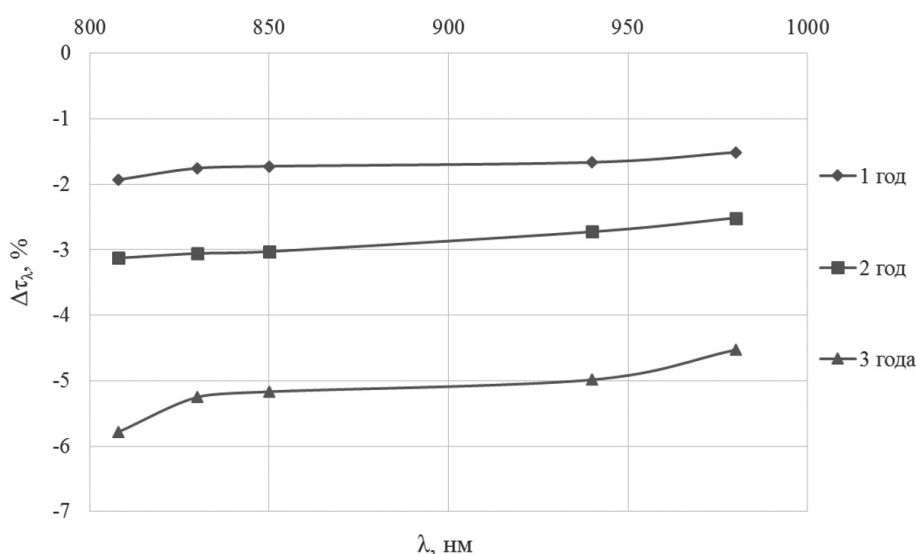


Рис. 4. Диаграмма графиков спектральной зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания образцов броневых стекол класса защиты 3ХЛ от времени эксплуатации в ближнем ИК диапазоне

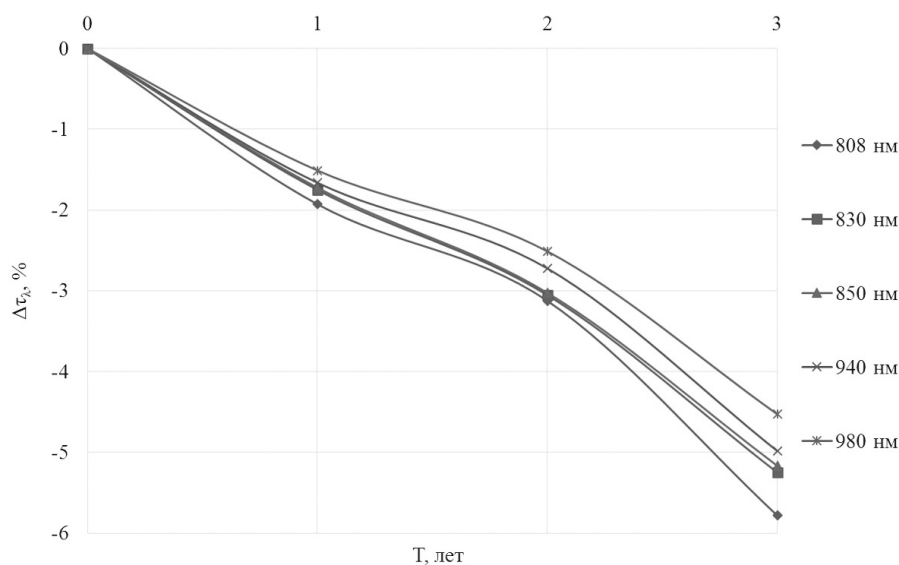


Рис. 5. Диаграмма графиков зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания образцов броневых стекол класса защиты 3ХЛ от времени эксплуатации для отдельных длин волн в ближнем ИК диапазоне

длин волн лазерного излучения, при которых наблюдались максимальные величины изменения спектрального коэффициента пропускания. Также не исключено влияние внутренних дефектов стекла, влияющих на локальное светорассеяние [8], вместе с тем, и наличие различных дефектов в специальном полимерном составе, соединяющим стеклянные пластины, непосредственно вызванное влиянием воздействия УФ-излучения, значительно ослабевает прохождение потока излучения [9]. Поскольку защитное стекло представляет собой монолитную конструкцию из стекла и пленок (или полимерных составов) [10, 12], суммарное влияние вносимых прозрачной броней искажений и дефектов может проявляться как в неточности данных по измерениям энергетического потока излучения для конкретных участков образцов, так и в нелинейном характере изменения пропускания образцов разных лет от времени их эксплуатации.

Выводы

Подтверждена целесообразность проведения оптических измерений броневых стекол в ближнем ИК диапазоне. Наиболее чувствительная область к изменению спектрального коэффициента пропускания образцов содержит длины волн 808 и 830 нм.

Выявлена характерная особенность измерений в ближнем ИК диапазоне, выраженная в идентичности кривых зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания от времени эксплуатации броневых стекол.

Литература

1. Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Добряков Б.Н., Сильников Н.М. Исследование зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол класса защиты 3ХЛ от времени эксплуатации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 7–8 (157–158). С. 157–162.
2. ГОСТ 111-2014 Стекло листовое бесцветное. Технические условия. — М.: Стандартинформ. 2015. 8 с.
3. ГОСТ Р 51136–2008 Стекла защитные многослойные. Общие технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов. 2008. 28 с.
4. Качалов Н.Н. Стекло. — М.: Издательство Академии наук СССР. 1958. 465 с.
5. ГОСТ 30494–2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. — М.: Стандартинформ. 2019. 20 с.
6. Шевцов С.Е., Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Добряков Б.Н. Исследование зависимости оптических характеристик броневых стекол от време-

ни их эксплуатации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 11–12 (113–114). С. 58–62.

7. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. 6-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003. 848 с.

8. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. Изд. 2-е. — СПб: Политехника. 2004. 679 с.

9. Бобоев Т.Б., Гафуров С.Дж., Истамов Ф.Х. Исследование влияния УФ-облучения на скорость разрушения полимеров // Прикладная физика. 2020. № 5. 93 с.

10. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты // Учебник для вузов. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 161 с.

11. Вильчинская С.С., Лисицын В.М. Оптические материалы и технологии: учебное пособие / С.С. Вильчинская, В.М. Лисицын // Томский политехнический университет — Томск: изд-во Томского политехнического университета. 2011. 107 с.

12. Меркулов Ю.Ю., Добряков Б.Н., Солк С.В., Шевцов С.Е. Проблемы обеспечения показателей качества броневых стёкол // Труды XIII Международной научно-практической конференции «Комплексная безопасность и физическая защита». 2017. С. 213–219.

References

1. Merkulov Yu.Yu., Dobryakov B.N., Solk S.V., Silnikov N.M. Research into dependence of the changing of spectral transmission coefficient of armored glasses of the 3rd class protection on their operating time // Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu. 2017. № 7–8 (157–158). P. 157–162. (in Russian).

2. State Standard 111-2014. Clear sheet glass. Specifications. — Moscow: Standartinform. 2015. 8 p. (in Russian).

3. State Standard P51136–2008. Protective laminate glass. General specifications. — Moscow: IPK Izdatelstvo standartov Publ. 2008. 28 p. (in Russian).

4. Kachalov N.N. Glass. — Moscow: USSR Academy of Sciences Publ. 1958. 465 p.

5. State Standard 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. — Moscow: Standartinform. 2019. 20 p. (in Russian).

6. Shevtsov S.Ye., Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Dobryakov B.N. Study on the dependence of optical characteristics of armored glasses on their operating time. Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu. 2017. № 11–12 (113–114). P. 58–62. (in Russian).

7. Landsberg G.S. Optics. Textbook for universities. 6th Ed. — Moscow: FIZMATLIT Publ. 2003. 848 p.

8. Handbook of optical technologist. Ed. by M.A. Okatov. 2nd Ed. — Saint-Petersburg: Politekhnik Publ. 2004. 679 p.

9. Boboev T.B., Gafurov S.Dzh., Istamov F.Kh. Investigation of the effects of UV irradiation on the rate of polymer destruction. Applied Physics. 2020. № 5. 93 p. (in Russian).

10. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. Light armor materials and structures. Textbook for universities. — Moscow: Bauman MSTU Publ. 2014. 161 p.

11. Vilchinskaya S.S., Lisitsyn V.M. Optical materials and technologies: textbook / S.S. Vilchinskaya, V.M. Lisitsyn // Tomsk Polytechnic University. — Tomsk: publishing house of Tomsk Polytechnic University. 2011. 107 p.

12. Merkulov Yu.Yu., Dobryakov B.N., Solk S.V., Shevtsov S.Ye. Issues of ensuring required quality parameters of armored glasses // Proceedings of the XIII International scientific-practical conference on integral security and physical protection. 2017. P. 213–219.