

УДК: 575.317; 681.7.066.6

DOI: 10.53816/23061456_2022_7-8_128

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО УФ-ОБЛУЧЕНИЯ
БРОНЕВЫХ СТЕКОЛ КЛАССА ЗАЩИТЫ ЗХЛ
НА ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ**

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF SHORT-WAVE UV IRRADIATION
OF THE 3RD CLASS PROTECTION ARMORED GLASSES
ON THE CHANGES IN SPECTRAL TRANSMISSION**

*Б.Н. Добряков¹, д-р техн. наук С.В. Солк², канд. техн. наук Ю.Ю. Меркулов³,
канд. техн. наук Н.М. Сильников³*

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

¹АО «НИИ телевидения», ²АО «НИИ ОЭП», ³АО «НПО Спецматериалов»

В статье рассматриваются результаты экспериментов, заключающихся в облучении защитного (броневое) стекла коротковолновым ультрафиолетовым излучением заданной мощности. Отмечено влияние ультрафиолетового излучения на разрушение полимерных составов броневое стекла. Облучение проведено в несколько этапов, после каждого из которых осуществлялось измерение спектрального пропускания облучаемых образцов и оценка величины воздействующего энергетического потока. Приведена схема установки по облучению опытного образца ультрафиолетовым излучением и описаны её характеристики. Описана методика проведения измерений энергетического потока лазерного излучения. Представлены результаты измерений. Выявлена зависимость изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол от времени облучения коротковолновым УФ-излучением. Подтверждена селективность влияния УФ-излучения на пропускание броневое стекла для разных длин волн.

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

The paper considers results of the experiments, where armored glasses have been irradiated with short wave ultraviolet radiation of a given power. The influence of ultraviolet radiation on the destruction of polymer compositions of armored glasses was noted. The irradiation has been carried out in several stages, after each of which the spectral transmission of the irradiated samples has been measured and the magnitude of the impacting energy flux has been estimated. The layout and characteristics of the installation for irradiating a prototype with ultraviolet radiation are described. The technique for measuring energy flux of laser radiation is described and the measurement results are presented in the paper. A dependence between changes in spectral transmission coefficient and duration of short-wave ultraviolet irradiation has been revealed. The selectivity of the effect of ultraviolet radiation on the transmission of armored glass for different wavelengths has been confirmed.

Keywords: armored glasses, ultraviolet radiation, optical measurements, spectral transmission coefficient.

Прозрачная броня, или броневые стекла, представляют собой конструкцию из нескольких слоев листового стекла [1], склеенных между собой при помощи специальных полимерных составов, заливаемых в пространство между стеклянными пластинами [2] (рис. 1). Благодаря высокой адгезии полимерных составов к стеклам, такие конструкции броневых стекол приобретают монолитные свойства [3].

Полимерные составы, в свою очередь, со временем эксплуатации броневых стекол подвержены естественному старению [4, 5]. Это связано с атмосферными волнениями среды эксплуатации, внутренними напряжениями и деформациями посредством температурных изменений. Все описанные выше явления оказывают в различной степени влияние на ухудшение баллистических свойств броневых стекол. Значительное воздействие на деградацию (деструкцию) полимерных составов оказывает электромагнитное излучение. В работах [6, 7] отмечается, что наиболее серьезными факторами деструкции полимерных материалов являются действия солнечного света, тепловое и ультрафиолетовое излучение. При воздействии ультрафиолетового (УФ) излучения на полимерные составы, в особенности в диапазоне от 290 до 400 нм, происходит его поглощение и возбуждение макромолекул, что вызывает разрушение слабых химических связей и образование активных свободных радикалов, провоцирующих разрушение полимера [7].



Рис. 1. Схема типовой многослойной прозрачной брони: 1 — слои стекла; 2 — прозрачный клей

В настоящей работе были проведены эксперименты по облучению коротковолновым УФ-излучением с последующим измерением спектрального пропускания единичного образца броневое стекла класса защиты 3ХЛ толщиной 37 мм с противоосколочной пленкой толщиной 0,38 мм (рис. 2), предоставленным АО «НПО Спецматериалов» в 2021 году. Была собрана установка по облучению испытуемых образцов коротковолновым УФ-излучением (рис. 3). Источником УФ-излучения служил UVC диод с диапазоном излучения 265–285 нм с центральной длиной волны 275 нм. На оправе (поз. 1, рис. 3) установлен параболический отражатель (поз. 2, рис. 3) с диодом UVC, расположенным в фокальной плоскости отражателя. Параллельный пучок, исходящий от отражателя, имеет эффективный диаметр порядка 10 мм. Образец (поз. 3, рис. 3) устанавливается противоосколочной пленкой (поз. 4, рис. 3) в направлении к отражателю на расстоянии порядка 100 мм, тем самым обеспечивая на поверхности противоосколочной пленки световое пятно диаметром 10 мм (рис. 2).

Работа проводилась в три этапа: 1) облучение в течение 140 часов с последующими измерениями спектрального пропускания, 2) облучение в течение 100 часов, общее время 240 часов и измерения спектрального пропускания и 3) облучение в течение 160 часов, общее время 400 часов и измерения спектрального пропускания. При подаче напряжения $U = 6,7$ В и постоянного тока $I = 0,15$ А на UVC диод была обеспечена стабильность потока УФ-излучения для создания на поверхности противоосколочной пленки освещенности равной $8,3 \pm 0,1$ мВт/см² в течение всего времени облучения и измерений.

Оптические измерения были проведены на территории АО «НИИ ОЭП». На рис. 4 изображена принципиальная схема рабочей измерительной установки. Излучение от лазерной установки (поз. 1, рис. 4) проходит опытный образец (поз. 2, рис. 4) в месте УФ-облучения, расположенный на столике с регулируемой высотой (поз. 3, рис. 4). Далее излучение падает на чувствительную площадку измерительной головки (поз. 4, рис. 4) и при помощи измерительной панели (поз. 5, рис. 4) регистрируется энергетический поток, прошедший испытуемый образец (табл. 1). Энергетический поток выбранной

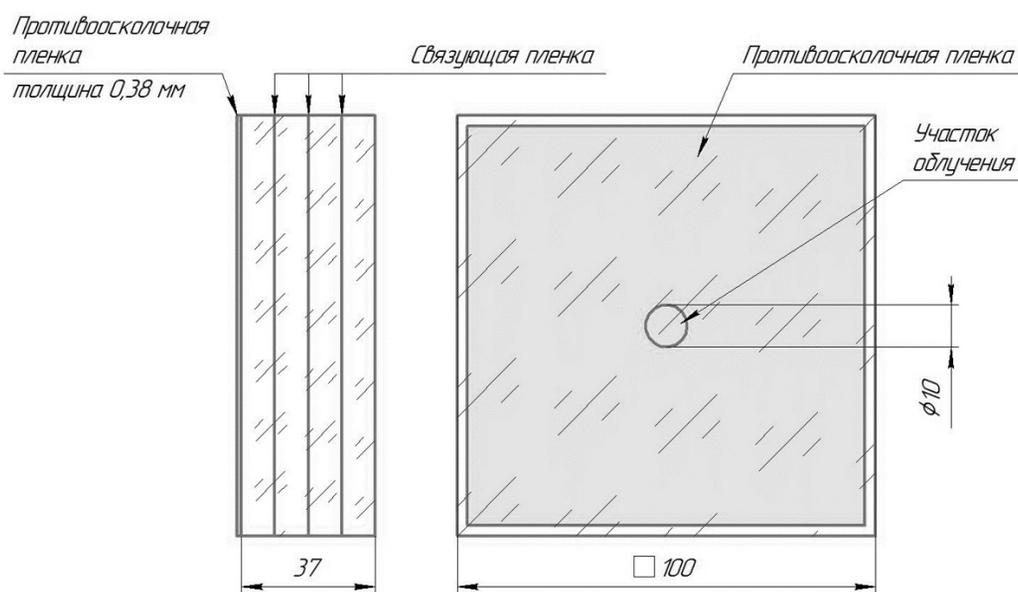


Рис. 2. Состав испытуемого образца броневое стекла класса защиты 3ХЛ и место его облучения УФ-излучением

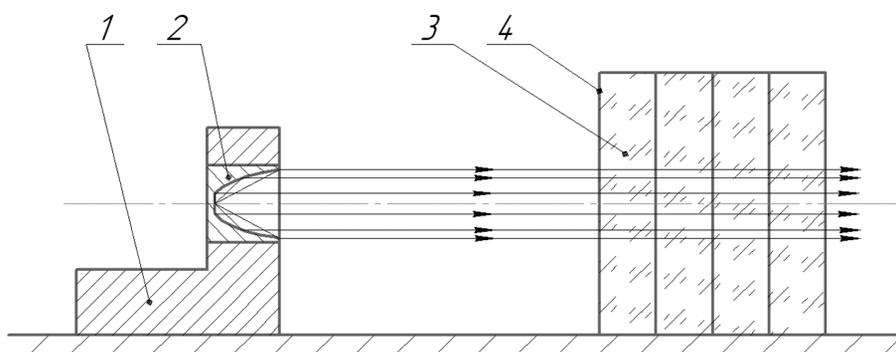


Рис. 3. Принципиальная схема установки по облучению коротковолновым УФ-излучением

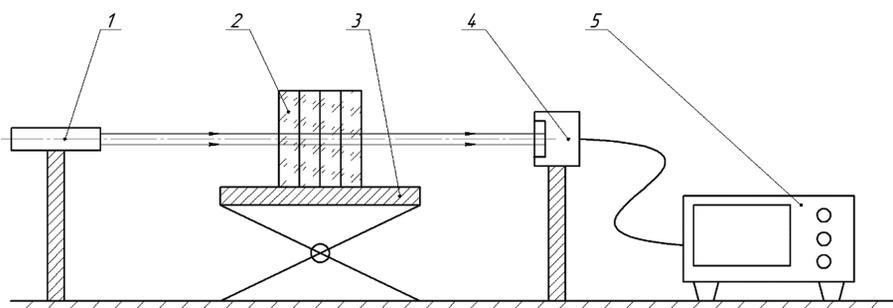


Рис. 4. Принципиальная схема измерительной установки: 1 — лазерная установка; 2 — образец; 3 — столик с регулируемой высотой; 4 — измерительная головка; 5 — измерительная панель

лазерной установки для каждой длины волны регистрируется с учетом стабилизации потока для обеспечения повышенной точности измерений, рис. 5. Оптические измерения проводились в лабораторных помещениях 2-й категории при

температуре 18–23 °С, относительной влажности 45–30 % [8] в периоды с декабря 2021 года по февраль 2022 года. Длина оптической трассы составляла не более 0,7 метра, влияние атмосферных изменений оценено как пренебрежительно

Таблица 1

Среднеарифметическое значение величины энергетического потока лазерного излучения при измерениях по прошествии времени УФ-облучения

| Длина волны λ , нм | Время облучения t , ч | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | 1 этап | | 2 этап | | 3 этап | |
| | лазерное излучение | 140 | лазерное излучение | 240 | лазерное излучение | 400 |
| | Энергетический поток, мВт | | | | | |
| | Φ_λ | Φ'_λ | Φ_λ | Φ'_λ | Φ_λ | Φ'_λ |
| 405 | 86,9 | 40,6 | 96,8 | 41,1 | 94,5 | 39,0 |
| 505 | 30,1 | 21,8 | 33,9 | 24,0 | 30,0 | 21,5 |
| 650 | 109,0 | 64,2 | 123,0 | 71,3 | 137,5 | 79,0 |
| 808 | 194,0 | 59,4 | 214,0 | 64,0 | 192,0 | 58,1 |
| 980 | 124,0 | 28,6 | 129,0 | 29,3 | 122,0 | 29,6 |

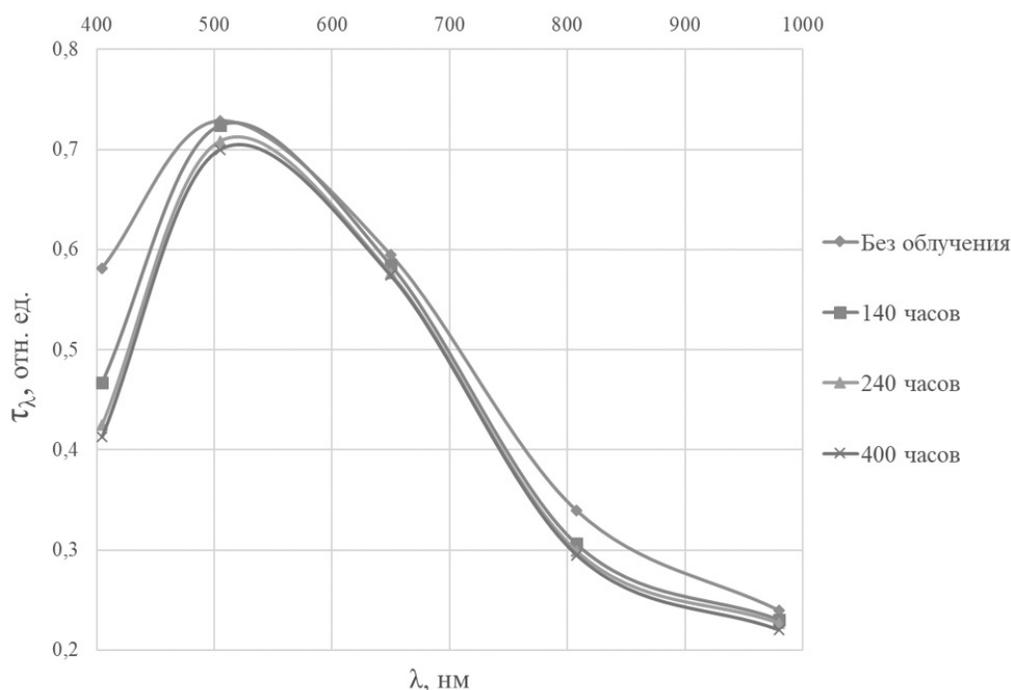


Рис. 5. Диаграмма графиков спектрального коэффициента пропускания по мере УФ-облучения образца бронированного стекла класса защиты 3ХЛ

малое. Аналогичная методика проведения измерений была использована в работах [9–11].

Результаты измерений энергетического потока лазерного излучения обрабатывались в программе Excel. При количестве измерений $n = 5$ усреднялись значения потоков лазерного излучения Φ_λ , мВт, и прошедшего через опытный образец в месте облучения Φ'_λ , мВт. Далее было вычислены значения спектрального коэффициента пропускания τ_λ , как соотношение усредненных

значений энергетического потока Φ'_λ , мВт, к потоку излучения Φ_λ , мВт, для каждой длины волны лазерного излучения по данному этапу [12].

$$\bar{\Phi}_\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_\lambda}{n};$$

$$\tau_\lambda = \frac{\bar{\Phi}'_\lambda}{\bar{\Phi}_\lambda}.$$

При оценке изменения пропускания опытного образца по мере его облучения УФ-излучением были вычислены разностные величины коэффициента пропускания в зависимости от накапливаемого времени облучения (табл. 2).

На рис. 6 отображена диаграмма графиков спектральной зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания опытного образца от времени воздействия УФ-излучения. Наиболее заметно наблюдаются изменения в фиолетовой области спектра, более 11 % падения значения пропускания за первые 140 часов облучения, в то время как при остальных длинах волн лазерного излучения изменение приблизительно одинаково на протяжении всех трех этапах облучения.

На рис. 7 отображена диаграмма графиков зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания опытного образца от времени УФ-облучения для каждой из выбранных длин волн лазерного излучения. Характер изменения спектрального коэффициента пропускания от времени облучения при всех длинах волн выражается в резком уменьшении пропускания образца в первые 180–220 часов облучения, после чего постепенно замедляется. Наименьшие показатели изменения пропускания образца наблюдаются для длин волн 505 и 650 нм, и вид кривых отличается от кривых для длин волн 808 и 405 нм — зависимость кажется более линейной с перегибами в области от 150 до 250 часов облучения.

Таблица 2

Зависимость изменения спектрального коэффициента пропускания от времени УФ-облучения образцов

| Длина волны λ , нм | Изменение спектрального коэффициента пропускания $\Delta\tau_\lambda$, % | | |
|-------------------------------|---|--------|--------|
| | время облучения t , ч | | |
| | 140 | 240 | 400 |
| 405 | -11,44 | -15,70 | -16,89 |
| 505 | -0,44 | -2,06 | -2,86 |
| 650 | -1,00 | -1,90 | -2,05 |
| 808 | -3,35 | -4,07 | -4,47 |
| 980 | -0,94 | -1,29 | -2,00 |

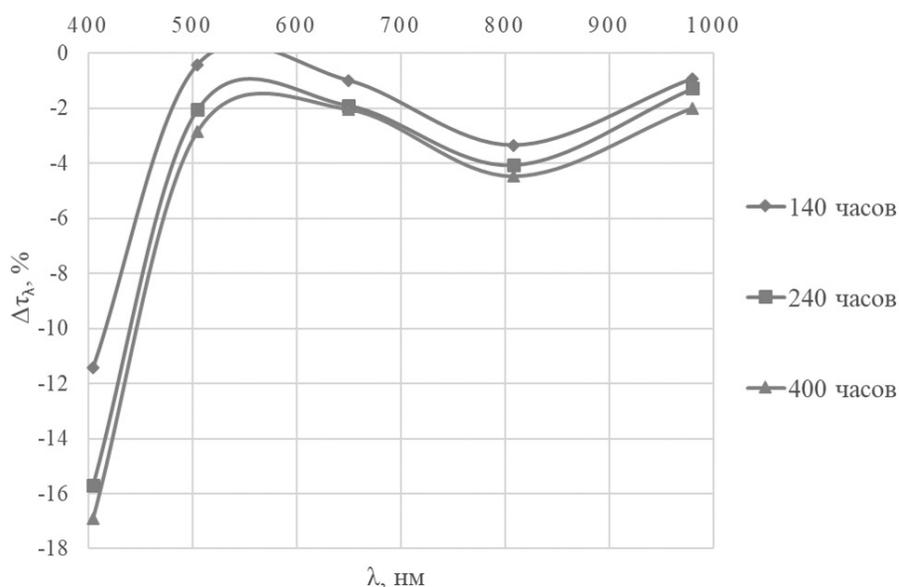


Рис. 6. Диаграмма графиков спектральной зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания образца броневое стекла класса защиты 3ХЛ от времени УФ-облучения

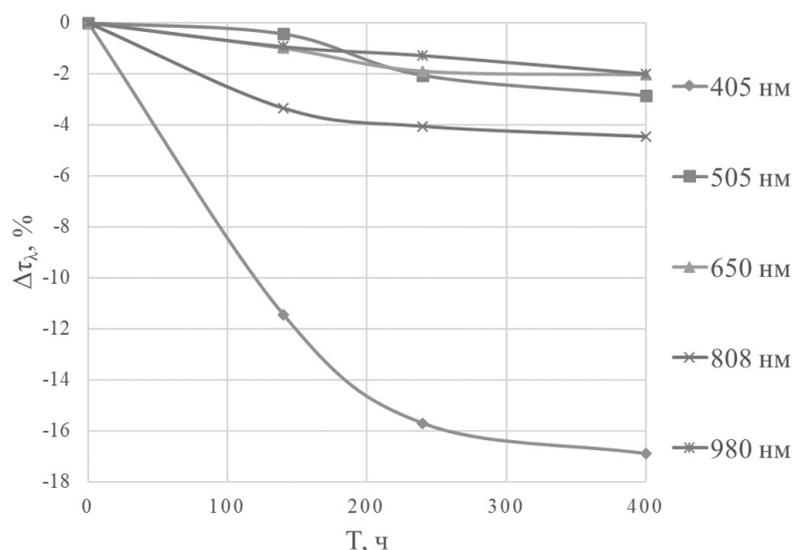


Рис. 7. Диаграмма графиков зависимости изменения спектрального коэффициента пропускания образца бронированного стекла класса защиты 3ХЛ от времени УФ-облучения для отдельных длин волн

Выводы

Выявлена характерная нелинейная зависимость изменения спектрального коэффициента пропускания броневых стекол от времени облучения коротковолновым УФ-излучением.

Влияние коротковолнового УФ-излучения определенно вызывает деградацию полимерного состава противоосколочной пленки и клеящего вещества, выражаемую в резком уменьшении пропускания бронированного стекла с постепенным замедлением влияния процесса.

Подтверждена селективность (избирательность) оказываемого влияния УФ-излучения на пропускание бронированного стекла для разных длин волн электромагнитного излучения.

Литература

1. Качалов Н.Н. Стекло. — М.: Издательство Академии наук СССР, 1958. 465 с., ил.
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. Сабинин В.Е., Солк С.В. Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 48–50.

5. Черезова Е.Н., Мукаменева Н.А., Архиреев В.П. Старение и стабилизация полимеров // Учебное пособие, часть 1. — Казань: Издательство КНИТУ, 2012. 140 с.

6. Луковников А.Ф. Фотохимические превращения полимеров / Стабильность полимерных материалов и изделий из них. — М.: МДНТП, 1971. С. 13–19.

7. Ярцев В.П., Кузнецова О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации. — Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун.-та, 2009. 124 с.

8. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. — М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

9. Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Добряков Б.Н. и др. Исследование зависимости оптических характеристик броневых стекол от времени их эксплуатации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 11–12 (113–114). С. 58–62.

10. Добряков В.Н., Шевцов С.Е., Михайлин А.И. и др. Влияние структурных дефектов в монокристаллах лейкоапатита на его баллистические свойства // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5–6 (119–120). С. 88–94.

11. Меркулов Ю.Ю., Солк С.В., Сильников Н.М. и др. Исследование зависимости из-

менения спектрального коэффициента пропускания броневых стёкол класса защиты 3ХЛ от времени эксплуатации // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 7–8 (157–158). С. 157–162.

12. Ландсберг Г.С. Оптика // учеб. пособие: Для вузов. 6-е изд. — М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.

References

1. Kachalov N.N. Glass. — Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1958. 465 p., il.

2. State Standard 111-2014 Clear sheet glass. Specifications. — Moscow: Standartinform, 2015. 8 p.

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

4. Sabinin V.E., Solk S.V. Problems of the design and fabrication of optics from polymeric materials // Optical Journal. 2002. Vol. 69. № 1. P. 48–50.

5. Cherezova E.N., Mukameneva N.A., Arkhireev V.P. Ageing and stabilization of polymers // Textbook. Volume 1. — Kazan: KNRTU Publ. 2012. 140 p.

6. Lukovnicov A.F. Photochemical transformation of polymers // Stability of polymeric materials and products. — Moscow: MDNTP, 1971. P. 13–19.

7. Yartsev V.P., Kuznetsova O.A. Prognostication of behaviour of building materials in adverse operation conditions. — Tambov: Publishing house of the Tambov State Technical University, 2009. 124 p.

8. State Standard 30494-2011 Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. — Moscow: Standartinform, 2019. 20 p.

9. Shevtsov S.Ye., Merkulov Yu.Yu., Solk S.V. et al. Study on the dependence of optical characteristics of armored glasses on their operating time // Voprosy oboronnoi tekhniki. Serii 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu. 2017. № 11–12 (113–114). P. 58–62.

10. Dobryakov B.N., Shevtsov S.Ye., Mikhlyin A.I. et al. Influence of structural defects in leucosapphire monocrystals on its ballistic properties // Voprosy oboronnoi tekhniki. Serii 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu. 2018. № 5–6 (119–120). P. 88–94.

11. Merkulov Yu.Yu., Solk S.V., Silnikov N.M. et al. 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. Serii 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu. 2017. № 7–8 (157–158). P. 157–162.

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