

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-163-171

УДК 623-4, 681.78

Адаптивная антитепловизионная защита подвижных объектов

Сергей Васильевич Михеев¹✉, Игорь Алексеевич Новиков²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

¹ Serg7uz@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-2042-7285>

² igor0nov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6543-940X>

Аннотация

В работе приведена классификация и представлено современное состояние антитепловизионной защиты объектов военной техники. В настоящее время повышение надежности работы таких объектов в боевых условиях — одна из ключевых задач. Выполнен анализ и рассмотрены перспективы развития существующих систем антитепловизионной защиты для движущихся объектов как важного фактора повышения их надежности. Показано, что наиболее перспективными являются системы антитепловизионной защиты активного типа. В работе предложено одно из направлений повышения надежности работы бронетехники и автотранспорта в современных условиях применения. В качестве примера, для бронетехники рассмотрена система антитепловизионной защиты, состоящая из активных охлаждающих модулей. Она может работать в двух режимах: скрытности и быстрого переохлаждения поверхности объекта («черная дыра»). В процессе работы антитепловизионной защиты использовано регулируемое охлаждение активных модулей жидким азотом. Разработаны конструкция и методика расчета параметров активных охлаждающих модулей. Преимуществами созданной антитепловизионной системы защиты объекта являются двухрежимная работа системы и использование заранее запасенного источника «холода», что позволяет обойтись без дополнительных затрат энергии в процессе работы. Предложенная система модульной активной антитепловизионной защиты может применяться для разных транспортных средств с соответствующей адаптацией под объект общей конструкции системы и модификации регулируемого охлаждающего активного модуля.

Ключевые слова

тепловидение, тепловизионная система, антитепловизионная защита

Ссылка для цитирования: Михеев С.В., Новиков И.А. Адаптивная антитепловизионная защита подвижных объектов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 163–171. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-163-171

Adaptive anti-thermal imaging protection for moving objects

Sergey V. Mikheev¹✉, Igor A. Novikov²

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

¹ Serg7uz@mail.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-2042-7285>

² igor0nov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6543-940X>

Abstract

The paper provides a classification and outlines the current state of anti-thermal imaging protection of military equipment. Currently, improving the reliability of such objects in combat conditions is one of the key tasks. The authors carried out the analysis and considered the prospects for the development of existing systems of anti-thermal imaging protection for moving objects as an important factor in increasing their reliability. It has been shown that the most promising are active-type anti-thermal imaging protection systems. The paper proposes a way to improve the reliability of armored

and other vehicles in modern conditions. As an example, an anti-thermal imaging protection system consisting of active cooling modules is considered for armored vehicles. It can operate in two modes: stealth and rapid supercooling of the object's surface ("black hole"). During the operation of the anti-thermal imaging protection, the system uses controlled cooling of active modules with liquid nitrogen. A design is proposed and a method for calculating the parameters of active cooling modules is developed. The advantages of the developed anti-thermal imaging system for protecting the object are as follows: dual-mode operation of the system and the use of a pre-stored "cold" source, which makes it possible to eliminate the need for additional energy consumption during operation. The proposed system of modular active anti-thermal imaging protection can be used for different vehicles with appropriate adaptation to the object of the general design of the system and modification of the adjustable cooling active module.

Keywords

thermal imaging, thermal imaging system, anti-thermal imaging protection

For citation: Mikheev S.V., Novikov I.A. Adaptive anti-thermal imaging protection for moving objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 163–171 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-163-171

Введение

При появлении любого вида обнаружения/распознавания/идентификации/наблюдения объектов военной техники возникает задача повышения скрытности объектов от одного из видов наблюдения. Данная задача повторяется и в области тепловидения. Первоначально были созданы приборы наблюдения — тепловизоры, или другими словами, тепловизионные системы (ТВС), затем началось развитие средств антитепловизионной защиты (АТВЗ).

Подробный анализ и перспективы развития ТВС наблюдения в разных инфракрасных (ИК) диапазонах (NWIR, SWIR, MWIR, LWIR) представлены в [1–7].

В настоящей работе этот анализ дополняется аспектом развития ТВС наблюдения, связанным с переходом от отдельных наблюдателей к сетям ТВС наблюдений. Выполнен анализ развития АТВЗ во времени как по функциональным возможностям, так и по средствам реализации. Это связано с тем, что в настоящее время повышение надежности работы военной техники является одной из ключевых задач для оборонной техники, особенно в боевых условиях при современных и быстро развивающихся перспективных технологиях противодействия противнику. При этом следует учитывать, что постепенно реализуется переход противостояния методов обнаружения — уничтожения от объектов военной техники к средствам их поражения. Данный подход повышает требования как к ТВС наблюдения, так и к системам АТВЗ военной техники и наиболее заметен в бронетехнике [7–10]. В связи с этим в настоящей работе предложено одно из направлений улучшения надежности работы для бронетехники и автотранспорта в современных боевых условиях. В качестве примера, для танка на платформе «Армата» рекомендована система антитепловизионной защиты, которая состоит из активных модулей, реализующих необходимое охлаждение. Предложена конструкция АТВЗ и активных модулей, а также разработана методика расчета их параметров. Система может работать в двух режимах: режиме скрытности и режиме быстрого переохлаждения поверхности объекта военной техники, названный в работе режимом «черная дыра». Существующие в настоящее время АТВЗ используют или принцип скрытности, или создание ложного тепловизионного образа объекта. Использование режима «черная дыра» повышает вы-

живаемость военной техники в боевых условиях, что является одним из преимуществ предложенной АТВЗ. Для регулируемого охлаждения активных модулей в АТВЗ используется жидкий азот, запасенный в баки типа сосудов Дьюара. Другое преимущество рассматриваемой АТВЗ — использование заранее заготовленного источника «холода», что позволяет ограничить затраты энергии в процессе ее работы. Рассматриваемая защита может применяться для разных транспортных средств с соответствующей адаптацией под объект общей конструкции АТВЗ и параметров активного модуля.

Современное состояние тепловизионных систем наблюдения и антитепловизионной защиты

Средства и системы наблюдения. Из всего многообразия средств обнаружения следует уделить внимание развитию и широкому распространению ТВС наблюдения, в задачу которых входят поиск, обнаружение, распознавание и идентификация объектов военной техники в условиях плохой видимости, таких как дождь, туман, снег, недостаточная освещенность. Развитие направлено на совершенствование технических характеристик ТВС наблюдения, а также на включение их в комплексные системы обнаружения, как показано на рис. 1.

В настоящее время существует тренд перехода от отдельных ТВС наблюдения к системе объединенных в сети наблюдателей. При этом можно реализовать разнесенное расположение наблюдателей и ИК лазеров, что

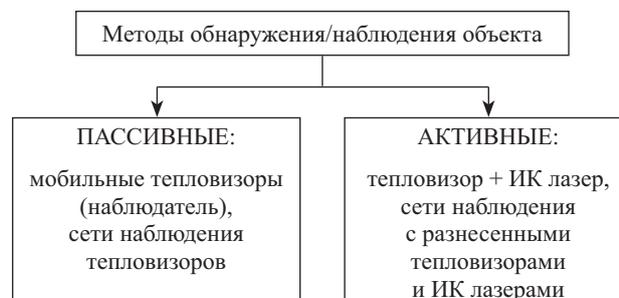


Рис. 1. Методы тепловизионных наблюдений объектов и их развитие

Fig. 1. Methods of thermal imaging observations of objects and their development

обеспечивает большую безопасность такой пассивно/активной сети. Следующий шаг — интегрирование таких активно/пассивных сетей ТВС в общую комплексную сеть наблюдения, которая может включать сети с различными видами наблюдения: ТВС, оптическими, радарными, а также объединяться с пассивными сетями радиоразведки.

Интенсивное развитие тепловизионного наблюдения инициировало развитие антитепловизионной защиты, при этом все многообразие АТВЗ можно разделить по временным и функциональным параметрам [8, 9]: мгновенного, кратковременного и длительного действия. Наиболее важными в боевых условиях являются АТВЗ кратковременного и мгновенного действия [8–10].

Для практической реализации АТВЗ используются два принципа [9].

Первый принцип — создание антитепловизионного покрытия (АТВП), которое отражает ИК излучение, исходящее от объекта защиты в рабочих ИК диапазонах (NWIR, SWIR, MWIR, LWIR) ТВС наблюдения. Таким образом, решается задача «обнуления» ИК излучения для ТВС. Область применения таких АТВП — лицевые щитки для стрелков, и бронестекла в военной технике различного назначения.

Второй принцип реализации АТВЗ — «обнуление» температурного контраста между объектом и средой. Обычно используются пассивные АТВП (без внутренних источников или поглотителей тепла), недостаток которых в том, что для каждой антитепловизионной задачи требуется свой тип АТВП. Область применения

пассивных АТВП — одиночные/групповые движущиеся фигуры, транспорт, пусковые установки с ракетами различного назначения и др. Полная комплексная классификация АТВЗ по принципу и длительности действия, а также по конструктивным параметрам, приведена на рис. 2. Следует отметить, что наибольшую площадь покрытия имеют аэрозольные и дымовые завесы, которые успешно применены в боевой обстановке, например, в Крыму и в Сирии.

Принято считать, что в процессе своего развития АТВЗ можно разделить на два поколения.

Первое поколение АТВЗ. АТВЗ длительного действия стали развиваться первыми и являются самыми простыми и наиболее очевидными.

Время действия таких систем в пределах от нескольких часов до нескольких суток и более. Функционально эти АТВЗ применяются для маскировки людей и крупногабаритной военной техники (стрелков, самолетов, ракет, пусковых установок, танков, БМП, БТР, и др.), при этом они используются также в периоды простоя, марша, подготовки к бою [8–10].

Второе поколение АТВЗ. Системы активного типа, или активно-пассивного типа, которые продолжают активное развитие и в настоящее время. Например, шведская АТВЗ «MCS» обеспечивающая защиту техники от средств обнаружения и идентификации; или АТВЗ для танка «Абрамс», которая охлаждает наиболее горячие зоны танка (двигатель, выхлопная труба) посредством подачи из бака жидкого азота, как показано на рис. 3, б.

Камуфляжная накидка «MCS» от «Saab Barracuda» (рис. 3, а) построена на принципе многослойной мо-

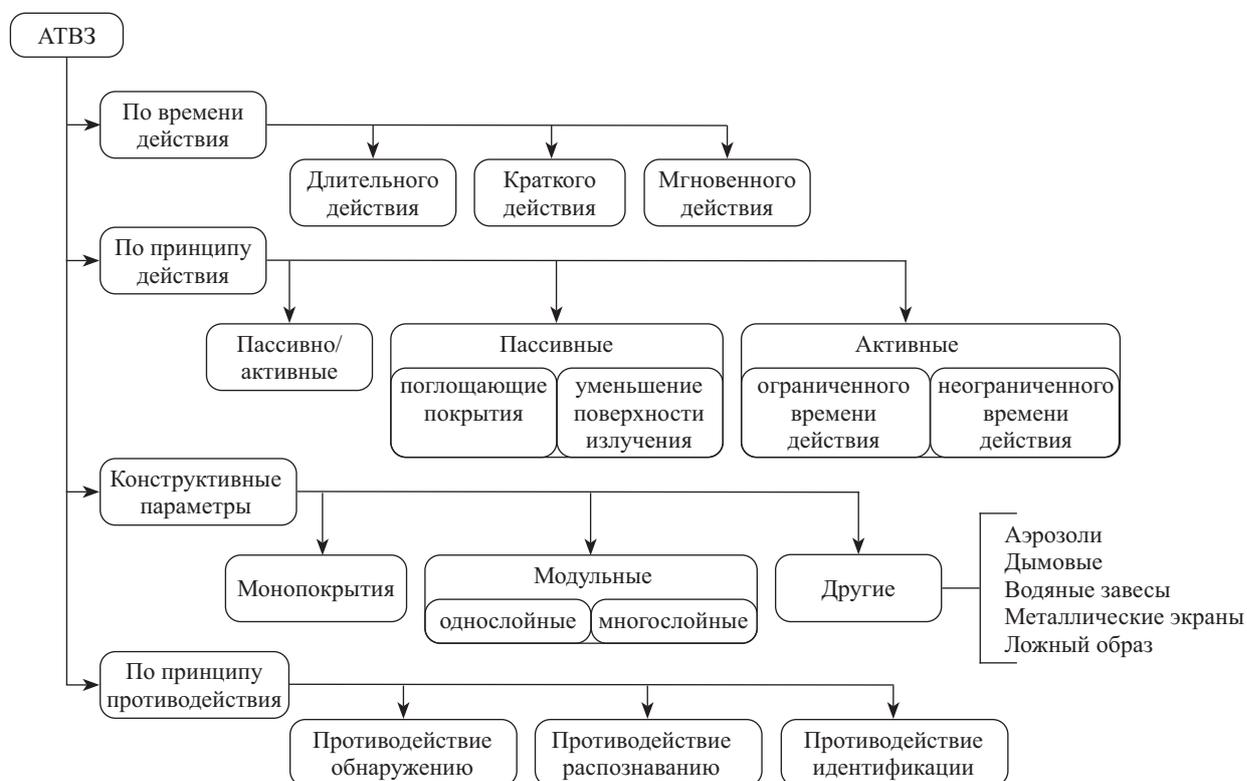


Рис. 2. Классификация антитепловизионной защиты

Fig. 2. Anti-thermal protection classification



Рис. 3. Шведская антитепловизионная защита «MCS» (а) и результат мультиспектрального камуфляжа на жидком азоте (b) для американского танка «Абрамс» (1 — система выключена, 2 — система активирована)

Fig. 3. Swedish anti-thermal protection “MCS” (a); and the result of multispectral camouflage based on liquid nitrogen (b) for the American Abrams tank (1 — the system is off, 2 — the system is activated)

дульной системы. Она обеспечивает многоспектральную (включая ИК диапазон) защиту военной техники от средств обнаружения и идентификации.

Наибольшими возможностями в настоящее время обладает шведская АТВЗ «Adaptiv» (рис. 4, а), которая позволяет маскировать танк под окружающую обстановку и создавать ложный образ. Основным элементом, создающим ложный образ – покрывающие технику «пиксели» (шестигранники), которые могут изменять температуру по команде и формировать ложный образ (рис. 4, б). Кроме того, рассматриваемая АТВЗ может поставить аэрозольную маскировку, произведя отстрел гранат, которые «ставят» специальные защитные завесы (АТВЗ мгновенного действия)¹.

Комплексные антитепловизионные защиты как наиболее перспективное направление развития

Одним из лучших и «простых» способов избежать обнаружения – сравнить изображение машины с фоном (окружающей средой) во всех спектрах. Пассивные системы, например: камуфляжная раскраска, маскировочные сети, инфракрасная раскраска и радиопоглощающие покрытия, обеспечивают данную возможность, но не в полной мере.

Наиболее перспективным подходом считается применение комплексных АТВЗ. При этом особенно возрастает роль АТВЗ мгновенного действия, которая должна стать адаптивной к окружающему фону, т. е. динамично менять характеристики защитного покрытия, обладающих высоким уровнем скрытности, работать на разных принципах [1, 8, 10, 11–13].

Наиболее актуальное место применения АТВЗ на защищаемом объекте – охлаждения наиболее горячих

зон танка (двигатель, выхлопная труба) с помощью бака с жидким азотом [8].

Необходимо учитывать, что современные системы наведения осуществляют обнаружение цели по ее температурному контрасту с окружающей средой; а распознавание объекта – по его термографическому образу. Поражение объекта происходит в наиболее уязвимых местах, которые являются максимально заметными.

Для обеспечения наиболее эффективной работы системы защиты в работе предложена АТВЗ, которая защищает уязвимые места объекта, подстраиваясь к окружающему тепловому фону, и искажает термографический образ военной техники дополнительно возможностью создания режима сильного переохлаждения объекта на короткий промежуток времени.

Как результат, тепловые и ИК головки наведения ракет рассматривают такие уязвимые места, как антицель, и ищут другие потенциальные цели, что повышает выживаемость объекта.

Пример тепловизионного изображения защищаемого объекта приведен на (рис. 5, а). На нем видно, что моторное отделение танка является наиболее уязвимым местом для обнаружения в ИК диапазонах.

Принцип работы и конструкция двухрежимной антитепловизионной защиты для подвижных объектов

В АТВЗ применено охлаждение жидким азотом двух основных частей защищаемого объекта: крыши машинного отделения и башенного отсека. АТВЗ может работать в двух режимах: снижение ИК излучения поверхности боевой машины до уровня окружающей обстановки в режиме скрытности путем постоянного контроля тепловых полей защищаемых частей объекта и окружающей среды; включение от системы управления АТВЗ режима «черная дыра», с помощью быстрого переохлаждения (на 30 °С ниже температуры окружающей среды) защищаемых частей объекта.

¹ BAE Systems. Adaptiv — a Unique Camouflage System [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.baesystems.com/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 10.10.2020).

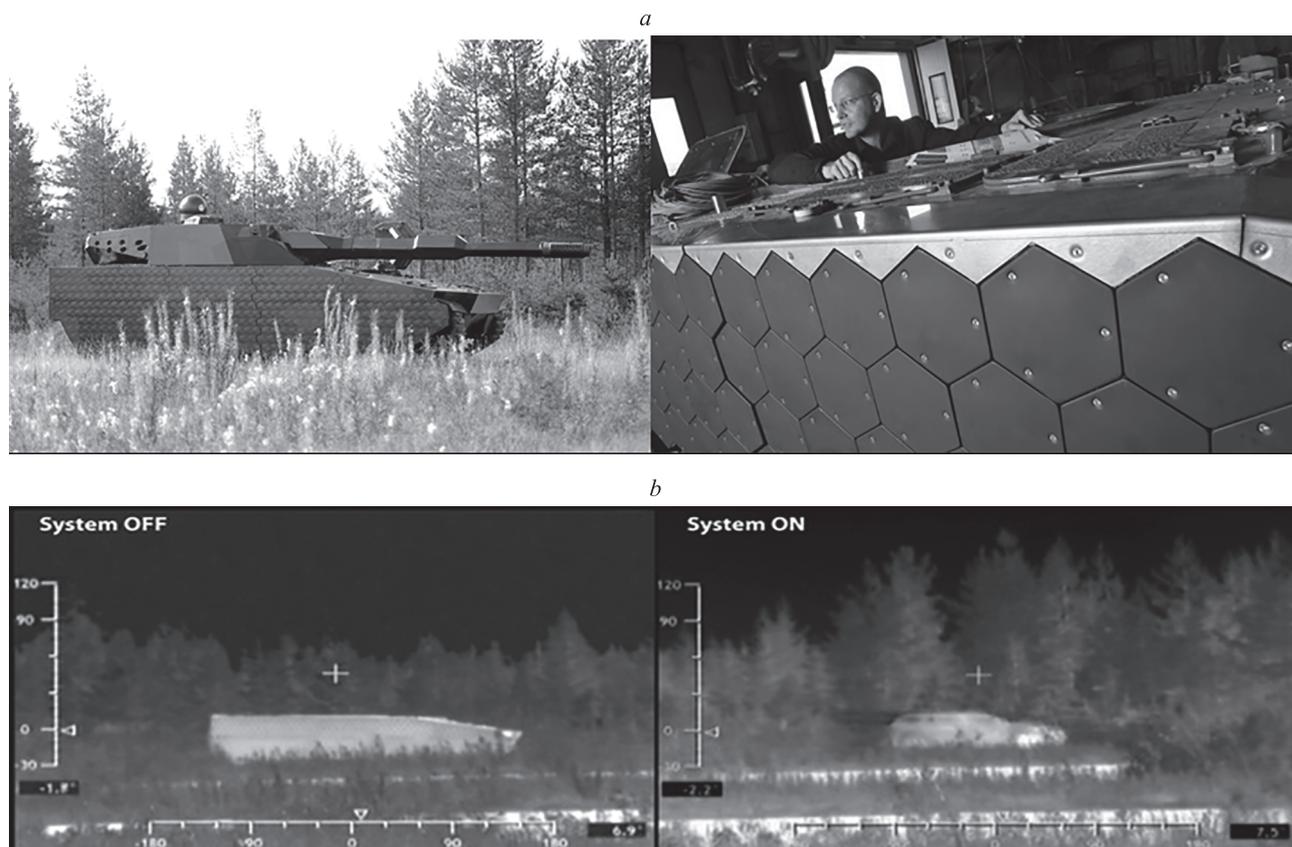


Рис. 4. Антитепловизионная защита типа «Adaptiv» (a) и ложный образ, создаваемый антитепловизионной защитой типа «Adaptiv» (b)

Fig. 4. Anti-thermal protection of the “Adaptiv” type (a). False image created by anti-thermal protection of the “Adaptiv” type (b)

Конструкция и расположение двухрежимной АТВЗ показана на рис. 5, b.

В состав АТВЗ входят (рис. 5, b): 1 — тепловизор ближнего поля действия НКТО-М. Он представляет собой оптико-электронный радар-тепловизор кругового обзора с постоянно сканирующей по периметру головкой (360°/1–0,5 раз в сек). Неохлаждаемый тепловизор

кругового обзора серии «мини» позволяет обнаруживать тепловые контрасты на земле, воде и в воздухе на 360° и расстоянии до 1,5 км. 2 и 3 — подсистемы АТВЗ для машинного и для башенного отделений соответственно, каждая из которых включает в себя: блок активных модулей; бак с жидким азотом и переходными устройствами; распределяющие трубки.

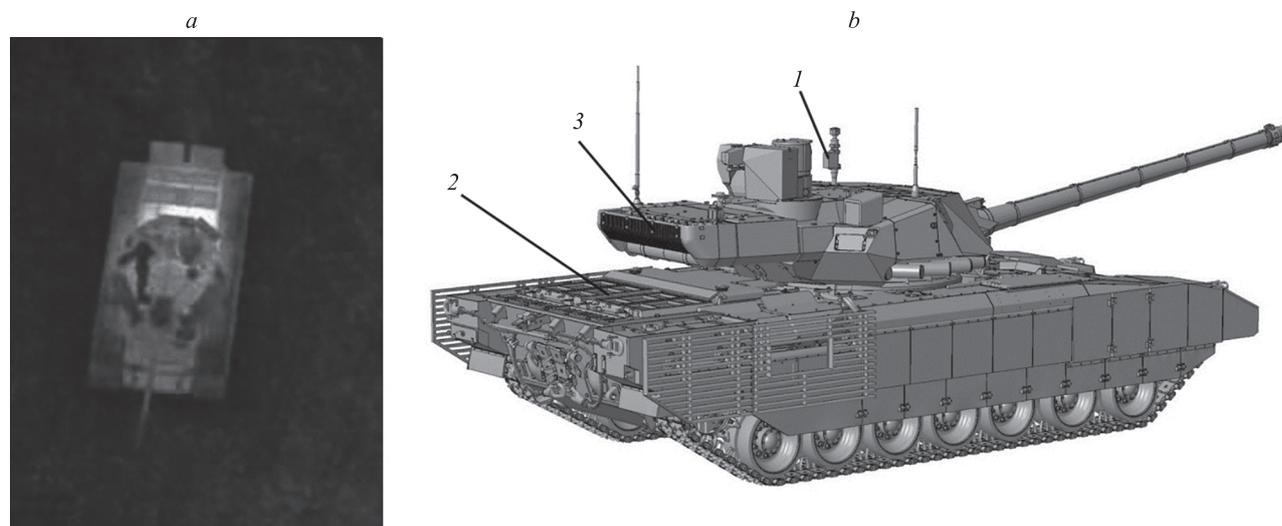


Рис. 5. Тепловизионное изображение танка (a); двухрежимная антитепловизионная защита активного типа на танке (b)

Fig. 5. Thermal image of the tank (a); dual-mode active type anti-thermal protection on the tank (b)

Корпуса баков, выполненные по принципу сосудов Дьюара, изготовлены из нержавеющей стали. Бак машинного отделения включает 160 л криогенной жидкости, а башенного — 80 л. Кроме того, в АТВЗ входит спроектированная система крепления активных модулей к броне танка.

Активный модуль охлаждения. В АТВЗ применяются активные модули охлаждения, изготовленные из твердого дисперсного материала — алюминиевой дробы одного диаметра (сплав АД31) посредством метода спекания под давлением [14]. При этом используется технология, обеспечивающая кубическую укладку элементов (дробей), что позволяет добиться высокой объемной пористости материала активных модулей, а именно, отношение объемов пор материала к полному объему тела $\Pi = 0,48$ [14]. Пористая структура активного модуля позволяет за счет протекания жидкого азота по каналам и его кипения в порах материала интенсивно и с высокой скоростью охладить внешнюю поверхность до температуры, значительно ниже (на 30 °С), чем температура окружающей среды [14, 15]. Конструкция активного модуля и его расположение относительно брони показаны на рис. 6.

На рис. 6, а показано расположение поверхностей брони с учетом прослойки воздуха между броней и активным модулем, и введены следующие обозначения: слой воздушной прослойки; слой активного модуля; окружающая среда; МО/БО — броня машинного/башенного отделения; АМ — активный модуль; δ — толщина воздушной прослойки, мм; d — толщина активного модуля, мм; α — коэффициент теплоотдачи для соответствующих границ: 1, 2, 3 — точки контакта теплообмена поверхностей; R_B — термическое сопротивление слоя воздуха; R_{AM} — термическое сопротивление активного модуля; ΔT — разница температур между броней и воздухом.

Тепловые расчеты активного модуля

Тепловые расчеты активного модуля включают в себя: конструкцию и теплофизическую модель, условия

реализации режимов скрытности и «черной дыры», расчет расходов жидкого азота защищаемого объекта в разных режимах работы, расчеты тепловой инерционности активного модуля и АТВЗ.

Конструктивно сборка активного модуля находится от поверхности объекта на расстоянии δ , заполненного спокойным воздухом ($\lambda_B = 2,37 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К)) [14]. Толщину активного модуля примем: $C_1 = 6$ мм (по результатам тепловых расчетов, проведенных ниже). С внешней стороны активного модуля соприкасается со средой (рис. 6, а).

Теплофизическая модель системы. Теплофизические характеристики дисперсного материала вычисляются по формуле Максвелла [15]. Результаты расчетов: теплопроводности дисперсного материала $\lambda_{AM} = 126$ Вт/(м·К); плотность дисперсного материала $\rho_{CP} = 1809,43$ кг/м³; удельная (массовая) теплоемкость $c = 921$ Дж/(кг·К); температуропроводность $a = 7,26 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Тепловая модель АТВЗ строится на основе следующих соображений: поверхность брони имеет известную температуру. На границе 1 существует тепловой контакт поверхности брони с прослойкой воздуха, толщина которой δ , мм, с учетом выполнения условия третьего рода с коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 10$ Вт/(м²·К) для спокойного воздуха [14]. Термическое сопротивление слоя воздуха R_B рассчитывается:

$$R_B = \delta/\lambda_B + 1/\alpha. \quad (1)$$

На границах 2 и 3 (воздуха и активного модуля) имеем тепловой контакт с таким же коэффициентом теплообмена α . При этом активный модуль состоит из пористого алюминия с теплопроводностью λ_{AM} , а термическое сопротивление слоя равно:

$$R_{AM} = d/\lambda_{AM} + 2/\alpha. \quad (2)$$

Полное термическое сопротивление R_0 слоев воздуха и активного модуля составляет сумму (1) и (2):

$$R_0 = R_{AM} + R_B = 3/\alpha + \delta/\lambda_B + d/\lambda_{AM}. \quad (3)$$

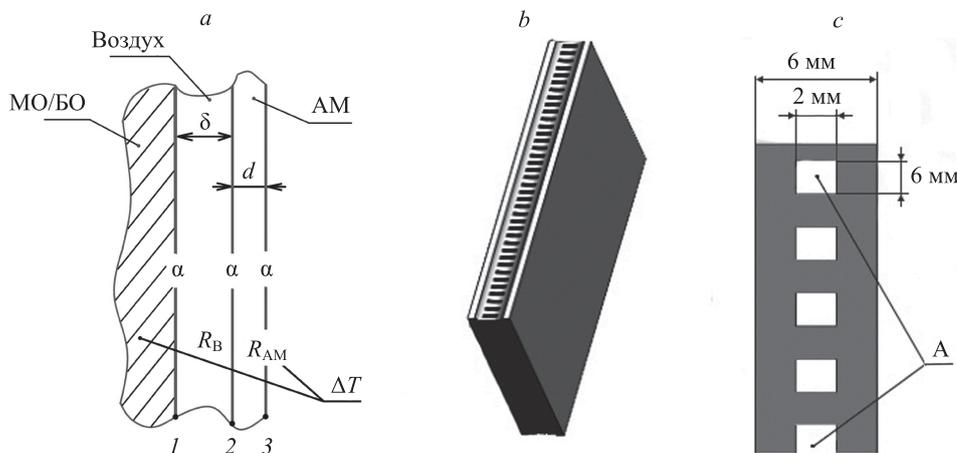


Рис. 6. Схема расположения слоев поверхностей антитепловизионной защиты (а); 3D-модель (b) и чертеж в разрезе (А — каналы для протекания жидкого азота) активного модуля (с)

Fig. 6. Layout of the surface layers of anti-thermal protection (a), 3D model (b), its drawing in section (A — channels for liquid nitrogen flow) of the active module (c)

Вычислим плотность теплового потока Q , проходящего от брони до внешней среды [14]:

$$Q = \Delta T_B / R_0 = \Delta T_B / (3/\alpha + \delta/\lambda_B + d/\lambda_{AM}), \quad (4)$$

где ΔT_B — разность температур нагретой поверхности брони и окружающей среды.

Среднюю температуру перегрева ΔT_{AM} активного модуля относительно внешней среды можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta T_{AM} &= Q \cdot R_{AM} = \gamma \Delta T_B; \\ \gamma &= (d/\lambda_{AM} + 2/\alpha) / (3/\alpha + \delta/\lambda_B + d/\lambda_{AM}). \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициент γ показывает, какая часть тепла переходит от брони в активный модуль, и зависит от теплофизических параметров материалов и толщины воздушной прослойки. Для рассматриваемых параметров АТВЗ зависимость $\gamma(\delta)$ приведена на рис. 7.

Анализ зависимости и конструктивных особенностей АТВЗ приводит к выбору оптимальной толщины воздушной прослойки, равной $\delta = 10$ мм.

Используя формулы (1)–(5), выполним расчет средних температур перегрева активного модуля для проектируемой АТВЗ. При этом перегрев брони ΔT_B эмпирически оценим величинами $\Delta T_B = 50$ °С и $\Delta T_B = 30$ °С для машинного и для башенного отделений соответственно. Результаты расчетов для перегрева активного модуля по отношению к температуре окружающей среды составит $\Delta T_{AM} = 14$ °С и $\Delta T_{AM} = 8$ °С для машинного и башенного отделений соответственно.

Расчет количества и расхода жидкого азота для охлаждения машинного и башенного отделений в режиме «черная дыра». Определим для активного модуля расчетное время срабатывания T_{CR} в этом режиме. Так как максимальные скорости ракеты или снаряда не превышают 300–320 м/с, а дальность их обнаружения составляет 900–1000 м, то время полета снаряда или ракеты в зоне обнаружения составляет $T_{CR} = 3$ с.

В условиях режима «черная дыра» (при резком охлаждении и кратковременности теплового процесса) можно считать, что процесс охлаждения активного

модуля происходит в верхней части конструкции АТВЗ адиабатически, при этом активный модуль охлаждается за счет теплоты парообразования при кипении жидкого азота, поданного в его пористую часть. Используя формулы (1)–(5), можно получить формулу для определения массы жидкого азота m_A , которую необходимо подать на сборку активного модуля, чтобы обеспечить его переохлаждение (на 30 °С по отношению к внешней среде):

$$m_A = Q_{AM} / Q_{00}; \quad Q_{AM} = C_B (\Delta T_{AM} + 30); \quad C_B = c \cdot m_{AM},$$

где Q_{00} — удельная теплота парообразования в жидком азоте ($Q_{00} = 2 \cdot 10^5$ Дж/кг [14]); ΔT_{AM} — температура перегрева активного модуля относительно внешней среды; c — удельная массовая теплоемкость материала активных модулей; параметры сборки активных модулей; C_B — теплоемкость; m_{AM} — масса (для моторной или башенной частей соответственно).

В расчетах использованы размеры, массы и сборки активных модулей для машинного и башенного отделений, вычисленные на основе построенных 3D-моделей (с применением пакета SolidWorks).

Результаты расчета однократного охлаждения машинного отделения с переохлаждением: необходимая масса жидкого азота сборки активного модуля составляет $m_A = 25,2$ кг. Расход жидкого азота p для сборки активного модуля в режиме «черная дыра» составляет $p = 8,4$ кг/с.

Результаты расчета однократного охлаждения башенного отделения с переохлаждением: необходимая масса жидкого азота сборки активного модуля $m_A = 10,9$ кг, а расход жидкого азота — $p = 3,64$ кг/с.

Предположим, что в процессе боестолкновения танку Т-14 приходится применять режим «черная дыра» не более четырех раз. После четырех однократных применений в этом режиме жидкого азота в баках машинного (объемом 160 л) и башенного (объемом 80 л) отделений остается $m_A = 21,2$ кг и $m_A = 18,7$ кг соответственно. Запасы жидкого азота в баках являются исходными для расчета длительности работы АТВЗ в режиме скрытности.

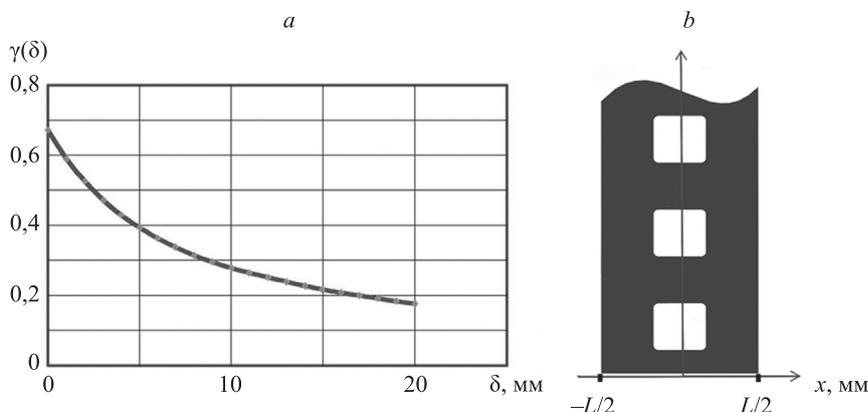


Рис. 7. Зависимость значения коэффициента γ от толщины воздушной прослойки δ (a); теплофизическая модель активных модулей для расчета его тепловой инерции, L — толщина пористой части активного модуля (b)

Fig. 7. Dependence of the value of the coefficient γ on the distance δ (a); thermophysical model of AM for calculating its thermal inertia, L — the thickness of the active module (b)

Расчет длительности работы АТВЗ в режиме скрытности. Используя (4), получим формулу для общей тепловой мощности Q_S , поглощаемой всей сборкой активных модулей при реализации режима скрытности (для машинного или башенного отделений):

$$Q_S = QS = \Delta T_B S / R_0,$$

где S — площадь всех активных модулей в сборке ($S = 2 \text{ м}^2$ и $S = 1,2 \text{ м}^2$ для моторного и башенного отделений). Соответственно, длительность работы режима скрытности t_0 можно вычислить по формуле:

$$t_0 = m_A Q_{00} / Q_S,$$

где m_A — оставшийся запас азота в баке. Расчеты показывают, что для машинного отделения эта длительность равна $t_0 = 1,28 \cdot 10^6 \text{ с}$, приблизительно 307 ч; а для башенного отделения $t_0 = 3,04 \cdot 10^6 \text{ с}$, приблизительно 800 ч. Таким образом, общая длительность работы АТВЗ в режиме скрытности для защищаемого объекта составляет 300 ч.

Предварительные расчеты активных модулей не учитывают продольные каналы, соответственно требуется пересчет массы модуля, энергии для охлаждения и расхода азота. Масса материала, использованного на каналы, составляет 17,1 % от массы. Таким образом, можно уменьшить расход азота для охлаждения модулей на 17,1 % и увеличить длительность работы системы в режиме скрытности.

Расчет тепловой инерционности активного модуля. Примем, что активный модуль — бесконечная пластина с граничным условием первого рода (заданная температура кипения азота $T_0 = -195,8 \text{ °C}$) в центре симметрии и условием теплоизоляции на внешних поверхностях (рис. 7, б).

Математическая формулировка задачи состоит из уравнения, граничного условия первого рода, условия теплоизоляции, и начального условия соответственно:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; T(x=0, t) = T_0; q(x=L/2, t) = 0;$$

$$T(x=0, t) = T_m + \Delta T_{AM},$$

где T_m — температура среды. Введем критерий Фурье $Fo = at/(L/2)^2$ и безразмерную температуру $\theta = (T(x, t) - T_0)/(T_m + \Delta T_{AM} - T_0)$, тогда решение задачи можно записать следующим образом [14]:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \cos[(2n-1)\pi(2x/L-1)/2] \times \exp[-Fo(2n-1)^2(\pi/2)^2]. \quad (6)$$

Используя рассмотренное решение, выполним оценку толщины активного модуля, которая обеспечивает тепловую инерционность АТВЗ в пределах $T_{CR} = 3 \text{ с}$. Примем $Fo = 0,3$, тогда в (6) можно оставить только первое слагаемое (регулярный режим) [14], что приводит к выражению вида:

$$\theta = \cos[(2x/L-1)\pi/2] \exp[-Fo(\pi/2)^2]. \quad (7)$$

При оценке толщины активного модуля в расчетах использована максимальная температура, которая находится на внешних границах активного модуля, что соответствует в формуле (7) $x = L/2$. При этом выражение для θ упрощается:

$$\theta = \exp[-Fo(\pi/2)^2]. \quad (8)$$

Если необходимо на границе активного модуля получить температуру $(T_m - 30)$, необходимое снижение температуры для башенного отделения, соответствующую условиям режима «черной дыры», то определим соответствующее критическое значение θ :

$$\theta_{CR} = (T_m - T_0 - 30)/(T_m - T_0 + \Delta T_{AM}). \quad (9)$$

Используя выражения (8) и (9), получим формулу для расчета максимальной толщины активного модуля, обеспечивающей их работу в режиме «черная дыра»:

$$L = -\pi^2 a T_{CR} / [2 \ln(\theta_{CR})].$$

При условии использования летней температуры среды (+35 °C) получим расчетную толщину активного модуля, равную 4 мм. Выполненная оценка толщины является заниженной, так как не учитывается фактор дополнительного охлаждения за счет испарившегося азота. Он вносит значительный вклад в общее охлаждение активного модуля, который возрастает с увеличением толщины. По предварительной оценке, реальная толщина слоя активного модуля может быть увеличена в 1,5–2 раза и находится в пределах $L = 6–8 \text{ мм}$.

Заключение

Предложена система антитепловизионной защиты, применимая для мобильных объектов военной техники, которая работает в двух режимах: скрытности, и быстрого переохлаждения по отношению к температуре внешней среды («черная дыра»). Двухрежимная работа отличает предлагаемую защиту от имеющихся в мире антитепловизионных систем. Использование второго режима значительно повышает надежность функционирования военной техники в боевых условиях.

Антитепловизионная защита имеет модульную структуру, при этом основой такой защиты является активный модуль с регулируемым охлаждением посредством жидкого азота. Использование баков с запасным жидким азотом позволяет антитепловизионной защите оперативно включаться в работу, не затрачивая дополнительной энергии для маскировки в инфракрасном диапазоне. Разработана методика расчета основных параметров антитепловизионной защиты и активного модуля, включая тепловые расчеты и расчет быстрого действия системы.

Полученные результаты позволяют реализовать предложенную антитепловизионную защиту для разных классов мобильных объектов, адаптируя под объект конструкцию и активный модуль охлаждения.

Литература

1. Якушенков Ю.Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3(79). С. 11–14.
2. Reine M.B. History of HgCdTe infrared detectors at BAE Systems // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7298. P. 72982S. doi: 10.1117/12.817850
3. Rothman J., de Borniol E., Abergel J., Lasfargues G., Delacourt B., Dumas A., Gibert F., Boulade O., Lefoule X. HgCdTe APDs for low-photon number IR detection // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10111. P. 101119. doi: 10.1117/12.2256175
4. Rogalski A. Next decade in infrared detectors // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10433. P. 104330L. doi: 10.1117/12.2300779
5. Mounier E. Technical and market trends for microbolometers for thermography and night vision // Proceedings of SPIE. 2011. V. 8012. P. 80121U. doi: 10.1117/12.877050
6. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 1–13.
7. Новиков И.А. Тренды развития тепловизионных наблюдений // Инновационные технологии и средства специального назначения: труды VI общероссийской научно-практической конференции / Балтийский государственный технический университет. СПб., 2013. С. 80–87. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»; № 19).
8. Михеев С.В., Новиков И.А., Горбачёв А.А. Анализ систем анти-тепловизионной защиты объектов // Известия вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 9. С. 756–760. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-756-760
9. Новиков И.А., Агошков О.Г., Иванченко М.М., Егоров Н.О. Критериальная оценка анти-тепловизионных покрытий // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды IV научно-практической конференции. СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2011. С. 85–93.
10. «Афганит» расстроил США сильнее «Арматы» // Информационное агентство «24РосИнфо», 22 марта 2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://24ri.ru/down/open/afganit-rasstroil-ssha-silnee-armaty.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 29.10.2020).
11. Novikov I.A. Harmonic thermal waves in materials with thermal memory // Journal of Applied Physics. 1997. V. 81. N 3. P. 1067–1072. doi: 10.1063/1.363849
12. Новиков И.А. Перспективы применения материалов с тепловой памятью // Военмех. Вестник БГТУ. 2013. № 16. С. 161–169.
13. Новиков И.А., Колпашчиков В.Л., Шнип А.И. Теплофизика процессов в материалах с тепловой памятью и перспективы их применения в новой технике // Инженер-механик. 2016. № 2. С. 19–25.
14. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. 2-е изд. М.: Энергия, 1978. 480 с.
15. Дутьнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 248 с.

Авторы

Михеев Сергей Васильевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55025889700](https://orcid.org/0000-0002-2042-7285), [http://orcid.org/0000-0002-2042-7285](mailto:serg7uz@mail.ru), serg7uz@mail.ru

Новиков Игорь Алексеевич — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 16473568400](https://orcid.org/0000-0001-6543-940X), [http://orcid.org/0000-0001-6543-940X](mailto:igor0nov@mail.ru), igor0nov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.11.2020
Одобрена после рецензирования 14.03.2021
Принята к печати 02.04.2021



References

1. Yakushenkov Y. Development tendencies of compact third generation infrared systems based on active-passive method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 3(79), pp. 11–14. (in Russian)
2. Reine M.B. History of HgCdTe infrared detectors at BAE Systems. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7298, pp. 72982S. doi: 10.1117/12.817850
3. Rothman J., de Borniol E., Abergel J., Lasfargues G., Delacourt B., Dumas A., Gibert F., Boulade O., Lefoule X. HgCdTe APDs for low-photon number IR detection. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10111, pp. 101119. doi: 10.1117/12.2256175
4. Rogalski A. Next decade in infrared detectors. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10433, pp. 104330L. doi: 10.1117/12.2300779
5. Mounier E. Technical and market trends for microbolometers for thermography and night vision. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 8012, pp. 80121U. doi: 10.1117/12.877050
6. Tarasov V., Yakushenkov Y. Modern state and development perspectives of foreign infrared imagers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 3(85), pp. 1–13. (in Russian)
7. Novikov I.A. Development trends in thermal imaging observation. *Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference Innovative Technologies and Technical Means of Special Purpose*. St. Petersburg, Baltic State Technical University “Voenmeh”, 2013, pp. 80–87. (in Russian)
8. Mikheev S.V., Novikov I.A., Gorbachev A.A. Analysis of systems for object protection against thermal-vision means. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 756–760. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-9-756-760
9. Novikov I.A., Agoshkov O.G., Ivanchenko M.M., Egorov N.O. Criterion evaluation of anti-thermal imaging covering. *Proc. of the IV Scientific and Practical Conference Innovative Technologies and Technical Means for Special Purposes*. St. Petersburg, Baltic State Technical University “Voenmeh”, 2011, pp. 85–93. (in Russian)
10. “Afganit” upset USA more than “Armata”. *Information Agency “24 RosInfo”*, March 22, 2016. Available at: <http://24ri.ru/down/open/afganit-rasstroil-ssha-silnee-armaty.html> (accessed: 29.10.2020). (in Russian)
11. Novikov I.A. Harmonic thermal waves in materials with thermal memory. *Journal of Applied Physics*, 1997, vol. 81, no. 3, pp. 1067–1072. doi: 10.1063/1.363849
12. Novikov I.A. Prospects for using materials with thermal memory. *Voenmeh. Vestnik BGTU*, 2013, no. 16, pp. 161–169. (in Russian)
13. Novikov I.A., Kolpashchikov V.L., Shnip A.I. Thermal physics in materials with thermal memory and prospects for their application in new equipment. *Inzhener-Mehanik*, 2016, no. 2, pp. 19–25. (in Russian)
14. Lykov A.V. *Heat and Mass Transfer*. Second ed. Moscow, Jenergija Publ., 1978, 480 p. (in Russian)
15. Dulnev G.N., Novikov V.V. *Transfer Processes in Heterogeneous Media*. Leningrad, Jenergoatomizdat Publ., 1991, 248 p. (in Russian)

Authors

Sergey V. Mikheev — PhD, Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55025889700](https://orcid.org/0000-0002-2042-7285), [http://orcid.org/0000-0002-2042-7285](mailto:serg7uz@mail.ru), serg7uz@mail.ru

Igor A. Novikov — D.Sc., Full Professor, Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 16473568400](https://orcid.org/0000-0001-6543-940X), [http://orcid.org/0000-0001-6543-940X](mailto:igor0nov@mail.ru), igor0nov@mail.ru

Received 18.11.2020
Approved after reviewing 14.03.2021
Accepted 02.04.2021

Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»