

Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации

Application of digital twin technology in the design of production processes, production and operation of complex technical systems in special operating conditions

УДК 658.512

Получено: 06.02.2022

Одобрено: 27.02.2022

Опубликовано: 25.03.2022

Гасюк Д.П.

Д-р техн. наук, профессор, действительный член Академии военных наук, директор Высшей школы машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Gasyuk D.P.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Full member of the Academy of Military Sciences, Director of the Higher School of Mechanical Engineering of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Ларькин В.В.

Канд. техн. наук, канд. ист. наук, докторант Михайловской военной артиллерийской академии

Larkin V.V.

Candidate of Technical Sciences, Candidate of Historical Sciences, doctoral student of the Mikhailovsky Military Artillery Academy

Косова В.А.

Аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Kosova V.A.

Postgraduate student of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Романов А.А.

Студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Romanov A.A.

Student of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Аннотация

Предприятия промышленности в настоящее время адаптируются к процессам цифровизации экономики Российской Федерации. Основным направлением в развитии информационных

технологий управления производством сложных технических систем (СТС) становится создание цифровых двойников. В данной статье анализируются понятия цифровизации и цифрового двойника. Дается представление о подходе к внедрению технологии цифрового двойника в процесс производства и эксплуатации СТС. Структурированы подклассы инновационного инструментария, применяемого в данной технологии. Представлены направления развития системы эксплуатации СТС ее подсистем в особых условиях. Особое внимание уделено способам диагностики и мониторинга состояния объектов с возможностью прогнозирования их изменения в реальном времени, а также применению аддитивных технологий в процессе восстановления работоспособности СТС.

Ключевые слова: цифровая тень, цифровизация, цифровой двойник, система эксплуатации, особые условия эксплуатации.

Abstract

The modern industry is digitalizing at an ultra-fast pace. An increasing number of industrial processes are controlled using digital technologies. Moreover, an increasing number of production and technological processes are implemented in a highly automated or robotic way, and for such processes it is generally impossible to control anything other than digital. A recent trend in the development of information technologies for production management is the creation of digital twins. This article analyzes the concepts of digitalization and digital twin. An idea is given about the approach to the introduction of digital twin technology into the production process and operation of complex technical systems, including in the transport industry. The subclasses of innovative tools used in this technology are structured. The directions of development of the system of functioning of its subsystems in special conditions are presented. Special attention is paid to methods of diagnostics and monitoring of the condition of objects with the possibility of predicting their changes in real time, as well as the use of additive technologies in the process of restoring the operability of complex technical systems, including transport.

Keywords: digital shadow, digitalization, digital twin, operating system, special operating conditions, road transport, cargo, cargo transportation, transportation, moving, transport.

В соответствии с Государственной программой Российской Федерации «Развитие машиностроения на период до 2025 года» в редакции, введенной в действие постановлением Правительства Российской Федерации №470-17 от 29 марта 2021 г., основные задачи в области формирования опережающего научно-технического задела и развития системы информационно-аналитического обеспечения предприятий машиностроения и его модернизации содержат внедрение современных средств проектирования и компьютерных технологий; внедрение перспективных систем обеспечения качества; эффективное использование информационных ресурсов в рамках единого информационного пространства, цифровизации всех интегрирующих процессов [1-8]. Важность данных направлений подчеркнул Президент Российской Федерации в своем выступлении перед кабинетом министров 4 декабря 2020 г. В рамках выступления президент России поручил провести в ближайшие 10 лет цифровую трансформацию Российской Федерации (РФ). Одним из основных направлений цифровизации на предприятиях машиностроения является создание системы управления полным жизненным циклом (СУПЖЦ) выпускаемой продукции. Создание такой системы позволит (по опыту ведущих иностранных государств) существенно снизить финансовые и материальные затраты на всех стадиях жизненного цикла сложных СТС и несомненно позволит повысить эффективность системы производства [9-15].

Материалы данной публикации являются результатом проведенного исследования, базирующегося на системном подходе с применением методов научного прогнозирования и экономического анализа, а также современных способов статистической обработки информации [16-20]. Результаты анализа предметной области свидетельствуют о том, что эффективность систем управления предприятиями промышленности все в большей степени зависит от достоверности, целостности, доступности, оперативности и качества обработки

необходимой информации [21-29]. Одной из основных задач в рамках решения проблемы создания СУПЖЦ продукции и цифровизации системы эксплуатации СТС является разработка цифрового двойника, который открывает кардинально новые возможности по информационному обеспечению всех этапов эксплуатации образца СТС, в том числе и с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) (рис. 1) [30].



Рис. 1. Управление полным жизненным циклом продукции

ГОСТ Р 57700.37-2021 установил единое определение понятия «цифровой двойник изделия» (ЦД), под которым понимается система, состоящая из цифровых моделей изделия и двусторонней информационной связи с ним и (или) его составными частями [31]. Он предоставляет возможность в режиме реального времени отслеживать потоки документов, реализовывать различные программы планирования производства и эксплуатации, проводить оценку эффективности функционирования СУПЖЦ в целом. Основные требования к технологическим процессам при этом остаются такими же, как при использовании традиционных моделей производства: гибкость, ресурсоемкость, надёжность, автоматичность, способность к быстрой наладке оборудования.

Возможность стабильно работать и обмениваться данными о своём состоянии в формате 24/7 - важный аспект цифровизации, который реализуется за счет роботизации и процесса имитационного моделирования. Возможности этого процесса будут ограничены только вычислительными мощностями и уровнем компетенции технологов и эксплуатантов СТС [32].



Рис. 2. Технология «цифрового двойника» СТС

Реализация технологии «цифрового двойника» предполагает применение инновационного инструментария (совокупности сквозных цифровых технологий), который можно разделить на несколько подклассов инструментов: инструменты для взаимодействия с физическим миром, инструменты для моделирования, инструменты для построения сервисов и приложений, инструменты для работы с данными, протоколы взаимодействия.

Применение цифрового двойника потребует создания программного продукта, основанного на едином научно-методическом аппарате, способном в реальном времени отображать производственную обстановку предприятия и совокупность условий эксплуатации образцов вооружения, а также методики мониторинга состояния данных систем, реализующей технологию цифровой тени.

Опыт эксплуатации СТС в особых условиях, а также результаты исследований свидетельствуют, что при сложившейся совокупности элементов, образующих систему эксплуатации СТС, значительное влияние на эффективность данной системы оказывает не только организация процесса её функционирования, но и в значительной мере функционал и возможности инструментария ее подсистем таких как:

- подсистема контроля работоспособности СТС;
- подсистема системы технического обслуживания и ремонта СТС;
- подсистема освоения СТС.



Рис. 3. Мониторинг состояния СТС

Сложность современных образцов СТС требует создания в корне новых способов диагностики и мониторинга состояния объектов с возможностью прогнозирования его изменения в реальном времени. Для эффективной эксплуатации образцов СТС и сокращения затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) необходим качественный мониторинг состояния образца СТС в процессе эксплуатации (рис. 3).

Актуальность контроля работоспособности СТС связана с развитием систем диагностирования и определяется, в том числе, требованиями руководящих и директивных документов [33-36].

Разработка такой системы потребует:

- создания информационных баз данных;
- автоматизации управленческих процессов ТОиР;
- внедрения технологии электронного двойника;
- создания системы поддержки принятия решений;

- разработки новых методов диагностирования СТС и совершенствования существующих;
- разработки и унификации новых средств диагностики (СД) с расширенными возможностями, средств отечественного программного обеспечения и элементов интерфейса [37].

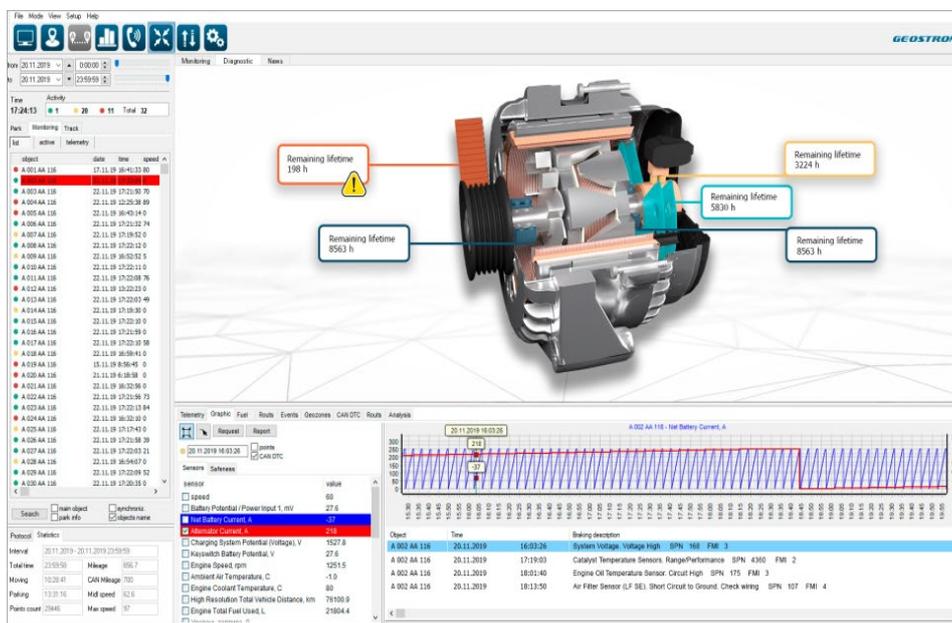


Рис. 4. Контроль параметров СТС

Требуют кардинального переосмысления подходы к принципам построения, структуре и задачам подсистем СЭ СТС. К примеру, для эффективной эксплуатации образцов СТС и минимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) необходима современная подсистема мониторинга работоспособности и предупреждения отказов (МРПО) СТС в процессе эксплуатации (рис. 4). Применяемые в настоящее время подходы и средства диагностики технического состояния, разработанные еще в 70-80-х годах XX в., не удовлетворяют потребности в качестве диагностирования узлов и агрегатов СТС (в особенности блоков цифрового оборудования и сложных электронных компонентов) и не предоставляют необходимую совокупность сведений о контролируемых параметрах для поддержания СТС в исправном состоянии. В связи с высокой интеллектуализацией современных и перспективных образцов СТС, возникает актуальная необходимость в анализе возможности внедрения автономных информационных систем (АИС), построенных на принципах предиктивной диагностики в структуру МРПО. АИС потенциально способна адаптировать графики техобслуживания к потребностям конкретного образца СТС, извлекать данные датчиков в реальном времени, встроенные в узлы и агрегаты СТС, предупреждать о возможности отказа узла или агрегата и давать рекомендации на их замену или техническое обслуживание, что позволяет значительно снизить процент выхода из строя образцов СТС по эксплуатационным причинам и позволит управлять уровнем технической готовности техники. Данный факт свидетельствует об актуальной необходимости разработки и внедрения новых способов диагностики и мониторинга состояния СТС с возможностью прогнозирования их изменения в реальном времени.

Совершенствование подсистемы восстановления работоспособности СТС напрямую связано с развитием и внедрением электронных моделей образцов техники. Применение технологии цифрового двойника позволит не только создавать более дешевую, надежную и качественную продукцию, но и значительно расширит перечень возможностей ремонтных органов. В первую очередь, это будет связано с применением аддитивных технологий и автоматизации процесса восстановления работоспособности СТС. Аддитивные технологии

(от англ. Additive Fabrication) – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом послойного добавления (add, англ. – добавлять, отсюда и название) материала. Получение изделия происходит послойно, шаг за шагом путем формирования (тем или иным способом) слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения CAD-модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим (рис. 5).



Рис. 5. Процесс послойного лазерного сплавления

Данная технология представляет значительный интерес для выполнения задачи повышения эффективности процесса восстановления работоспособности СТС. Послойный синтез предполагает проведение построения в среде инертного газа с охлаждением определенных зон, с местной усадкой металла, с захватом молекул газа окружающей среды (азота или аргона), с образованием дефектов, вызванных работой лазера, неоднородностью модельного материала и др. Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов (полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

Наиболее важные достоинства аддитивных технологий заключаются в:

- значительном сокращении длительности технологических процессов и уменьшении производственных отходов;
- уменьшении номенклатуры материалов и себестоимости изделий;
- вариативности и индивидуализации изготавливаемых и восстанавливаемых изделий;
- возможности изготовления деталей высокой сложности;
- улучшении характеристик готовых изделий и придании дополнительной прочности восстанавливаемым изделиям;
- мобильности производства и ремонта;
- снижении веса деталей;
- сокращении сроков обучения персонала ремонтных органов.

Активное применение аддитивных технологий изменит привычный уклад технологических процессов производства и восстановления деталей. Многофункциональный 3D-принтер не только добавит процессу восстановления СТС мобильности, но и сможет заменить значительный перечень оборудования, как в стационарных, так и в передвижных мастерских.

В условиях широкого распространения технологии 3D печати и активного применения роботизированных многофункциональных станков с числовым программным управлением (ЧПУ), автоматизации основного перечня операций ремонта, требует глубокого переосмысления процесс технического обслуживания и ремонта СТС, а также процесс

пополнения комплектов запасных частей и принадлежностей (ЗИП). Совершенствование подсистемы технического обслуживания и ремонта (СТОР) СТС также будет напрямую связано с развитием и внедрением электронных моделей цифровых двойников, аддитивных технологий и автоматизации процесса ТОиР СТС. Требуют всестороннего изучения возможности применения технологии цифрового двойника, систем управления техническим обслуживанием с применением ИИ, а также внедрения новых способов ремонта и разработки новых робототехнических эвакуационных и ремонтных средств, применение которых потенциально способно беспрецедентно расширить возможности ремонтных органов. В перспективе такая система позволит перейти от регламентированной планово-предупредительной системы ТОиР к системе ремонта СТС по состоянию или к проактивной системе ТОиР и позволит модульно выбирать ту или иную СТОР для конкретного комплекса или образца СТС с учетом технической сложности и режима экономии денежных средств на поддержание его в исправном состоянии.

Соответственно перспективными направлениями использования технологии «цифрового двойника» и аддитивных технологий в интересах повышения эффективности эксплуатации СТС следует рассматривать:

- оперативное изготовление деталей для ремонта СТС;
- изготовление запасных частей, комплектующих и изделий с оптимизированной геометрией и сложной конфигурацией;
- изготовление специализированного инструмента, приспособлений и оснастки в соответствии с возникающими потребностями.

Развитие подсистемы освоения СТС в среднесрочной перспективе будет связано с совершенствованием существующей 3-х ступенчатой программы применения УТС магистрально-модульной архитектуры построения. Данная программа будет основана на внедрении автоматизированных информационных технологий и технологий искусственного интеллекта, таких как:

- адаптивное обучение;
- персонализированное обучение;
- автоматическое оценивание;
- интервальное обучение.

Визуализация операций технического обслуживания и ремонта СТС при обучении эксплуатации и ремонту будет осуществляться на основе интерактивной электронной ремонтной документации, разрабатываемой на каждый образец СТС (на основе внедрения технологии цифрового двойника).

Вышеуказанные тенденции свидетельствуют о необходимости совершенствования всех подсистем СЭ СТС и разработки концепции технического облика перспективной системы эксплуатации СТС на основе внедрения технологии цифрового двойника.

Литература

1. *Солохов И.В.* Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С. 45-51.

2. *Ведерников Ю.В.* Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия / *Ю.В. Ведерников [и др.]* // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5-6 (71-72). С. 61-72.

3. *Сауренко Т.Н., Анисимов Е.Г., Родионова Е.С.* Методика оценки ожидаемой стоимости проектирования технических и технологических инноваций // Управленческое консультирование. 2019. № 11 (131). С. 120-128.

4. *Сауренко Т.Н.* Оптимизация параметрических рядов продукции предприятия с учетом случайности рыночного спроса и упущенной выгоды // Журнал исследований по управлению. 2022. Т. 8. № 2. С. 3-9.

5. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Черныш А.Я.* Эффективность инвестиций. Методологические и методические основы.- Москва: Военная Ордена Ленина,

Краснознамённая, Ордена Суворова Академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2006.- 123 с.

6. *Анисимов В.Г.* Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии и производственной программы предприятия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. 2016. № 2. С. 62-73

7. *Чварков С.В.* Учет неопределенности при формировании планов инновационного развития военно-промышленного комплекса // Актуальные вопросы государственного управления Российской Федерации: Сборник материалов круглого стола.- Военная академия генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации, Военный институт (Управления национальной обороной). 2018. С. 17-25.

8. *Афанасьев, А.С.* Управление процессами жизненного цикла / А.С. Афанасьев, Ю.Л. Вященко, К.М. Иванов // ВОЕНМЕХ БГТУ, Балтийский Государственный Технический Университет ВОЕНМЕХ Им. Д. Ф. Устинова. – 2019, – №5 (58).

9. *Тебекин А.В.* Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ // Журнал исследований по управлению. 2018. Т. 4. № 11. С. 30-38.

10. *Сауренко Т.Н.* Концептуальные положения оценки эффективности инновационного развития компании // Экономические стратегии ЕАЭС: проблемы и инновации: Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции.- Москва: Российский университет дружбы народов, 2019. С. 217-234.

11. *Тебекин А.В.* Эволюционная модель прогноза частных показателей инновационных проектов (на примере технических инноваций) // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 6. С. 55-61.

12. *Анисимов В.Г.* Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 6-12..

13. *Песчанникова Е.Н.* Методический подход к формированию портфеля заказов предприятия // Журнал исследований по управлению. 2021. Т. 7. № 2. С. 41-50.

14. *Черныш А.Я.* Стохастическая модель оценки сроков окупаемости инвестиций в инновационные проекты // Журнал исследований по управлению. 2022. Т. 8. № 1. С. 3-9.

15. *Ковальчук А.М., Романюта А.Е.* Методический подход к оценке надежности циклически применяемых сложных технических систем // Журнал технических исследований. 2021. Т. 7. № 4. С. 57-62.

16. *Авдеев М.М.* Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами. Санкт-Петербург; Тула: Гриф и К (Тула). 2001.- 139 с.

17. *Тебекин А.В.* Модель прогноза стоимости и сроков модернизации промышленных предприятий // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 3. С. 31-37.

18. *Анисимов Е.Г.* Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2016. № 3 (21). С. 22-32.

19. *Ильин И.В.* Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты. - Санкт-Петербург, 2018. 289 с.

20. *Анисимов В.Г.* Методы оперативного статистического анализа результатов выборочного контроля качества промышленной продукции / В.Г. Анисимов, Е.Г. Анисимов [и др.].- Санкт-Петербург, Тула: Международная академия информатизации. 2001.- 72 с.

21. *Сауренко Т.Н.* Прогнозирование инцидентов информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. С. 24-28.

22. *Anisimov, V.G., Anisimov, E.G., Zegzhda, P.D., Saurenko, T.N., Prisyazhnyuk, S.P.* Indices of the effectiveness of information protection in an information interaction system for controlling complex distributed organizational objects // Automatic Control and Computer Sciences, 2017, 51(8), pp. 824–828. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0146411617080053>.

23. *Зегжда П.Д.* Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 4. С. 45-49.10.
24. *Анисимов Е.Г.* Основы построения моделей интеллектуализации в системах безопасности // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9-10 (75-76). С. 22-27.
25. *Зегжда П.Д.* Модели и метод поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности информационно-управляющих систем // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 43-47.
26. *Балясников В.В.* Модель причинного анализа на основе использования данных об особых ситуациях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 1-2. С.31 – 38.
27. *Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г., Босов Д.Б.* Сетевые модели и методы ресурсно-временной оптимизации в управлении инновационными проектами.- Москва, 2006.- 117 с.
28. *Тебекин А.В.* Методический подход к моделированию процессов формирования планов инновационного развития предприятий // Журнал исследований по управлению. 2019. Т. 5. № 1. С. 65-72.
29. *Анисимов В.Г.* Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности. Москва: Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; 2006. 288 с.
30. *Пономарев, К. С.* Цифровой двойник производства - средство цифровизации деятельности организации // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. – № 2(4). – С. 11-17. – DOI 10.30987/article_5cf2d1c56f8944.09486334.
31. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и имитационное моделирование. Цифровые двойники продуктов. Основные положения.
32. *Пантюхин, О. В.* Цифровой двойник изделий специального назначения / О. В. Пантюхин, С. А. Васин // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 1(171). – С. 37-40. – DOI 10.31145/1999-513x-2021-1-37-40.
33. *Рахманов, М. Л.* Современные цифровые технологии и цифровой двойник / М. Л. Рахманов, А. В. Шишкин // Качество и жизнь. – 2021. – № 2(30). – С. 57-59. – DOI 10.34214/2312-5209-2021-30-2-57-59.
34. Указ Президента РФ от 21.07.2020 г. №474 «О Национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» - URL: <https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=home&rnd=9807B19AB7015F491A50A89BE40C6D94#doc/LAW/357927/0/1635228762182> (дата обращения: 11.10.2021).
35. Указ Президента РФ от 10.10.2019 г. №490 «О Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года» - URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_335184/ (дата обращения: 11.10.2021).
36. Указ Президента РФ от 16.12.2015 г. № 623 «О национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники» - URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_190576/ (дата обращения: 11.10.2021).
37. Указ Президента РФ от 07.05.2012 г. №603 «О реализации планов (программ) строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса» - URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=LAW;n=129338;req=doc#IBuOtmSUFHRtTa3x1> (дата обращения: 11.10.2021).