

УДК: 623.4.01

DOI: 10.53816/20753608_2024_2_37

**О V-ДИАГРАММЕ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ
ВООРУЖЕНИЯ, ВОЕННОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ПАРАДИГМЕ
СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ**

**ABOUT THE V-DIAGRAM OF THE CREATION OF PRODUCTS OF A HIGH
DEGREE OF TECHNOLOGICAL COMPLEXITY OF WEAPONS OF MILITARY
AND SPECIAL EQUIPMENT IN THE PARADIGM OF SYSTEM ENGINEERING
BASED ON DIGITAL TWINS**

По представлению чл.-корр. РАН А.И. Михайлина

А.И. Боровков, В.Ю. Кулемин

СПбПУ Петра Великого

A.I. Borovkov, V.J. Kulemin

Предложена форма и содержание V-диаграммы создания изделий с высокой степенью технологической сложности (ИВСТС) вооружения, военной и специальной техники, как совокупность, водопада требований и лестницы синтеза на основе принципов, методов и технологии системного инжиниринга, обеспечивающих формирование многоуровневых матриц требований и ресурсных ограничений цифровых двойников изделий ИВСТС дающих возможность создавать изделия в ограниченный срок и заданную стоимость с высоким качеством.

Ключевые слова: V-диаграмма, изделие высокой степени технологической сложности, вооружение, военная и специальная техника, многоуровневая матрица требований и ресурсных ограничений, цифровой двойник изделия.

The form and content of the V-diagram of the creation of products with a high degree of technological complexity (PHDTC) of weapons of military and special equipment, as a set of waterfall requirements and synthesis stairs based on the principles, methods and technology of system engineering, providing the formation of multi-level matrices of requirements and resource constraints of digital counterparts of PHDTC products that make it possible to create products in a limited time and a set price with high quality.

Keywords: V-diagram, product of high degree of technological complexity, of weapons, military and special equipment, multi-level matrices of requirements and resource constraints, digital twin of the product, system engineering.

Введение

Обеспечение технологической субъектности РФ идет путем развития собственных передовых производственных технологий, которые будут ориентированы в том числе на создание изделий

с высокой степенью технологической сложности (ИВСТС) вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ). В 2023 году на Валдайском форуме президент Российской Федерации В.В. Путин отметил: «... величие России на сегодняшний день заключается в укреплении ее суверенитета,

а суверенитет основан на самодостаточности в технологиях, в финансах, в экономике в целом, в сфере обороны и безопасности» [1]. Учитывая, что образец ИВСТС ВВСТ — сложная техническая система систем, являющаяся порой краеугольным камнем в обеспечении суверенитета и безопасности государства, при создании которого необходим точный и взвешенный подход к определению и выполнению требований и ограничений не ниже и/или выше мирового уровня на всем жизненном цикле (ЖЦ) включая проектирование, производство и эксплуатацию нам необходима современная технология его создания и эксплуатации.

Одной из таких технологий создания ИВСТС является, подход и метод на основе системного, логического анализа и синтеза с позиций системного инжиниринга, на основе цифровых двойников изделий [2]. Решение проблемы создания ИВСТС с применением методов и технологии системного инжиниринга, идет путем формирования водопада требований и лестницы синтеза в виде V-диаграммы создания изделия, где происходит формирование многоуровневых матриц требований и ресурсных ограничений на основе цифровых двойников изделий (ЦД) [3] для ИВСТС как сложной технической системы, путем выработки устойчивых, непротиворечивых решений, отвечающих всему набору предъявляемых требований, ограничений и характеристик.

Предлагаемый путь создания новых образцов ВВСТ с применением многоуровневой матрицы и цифровой модели изделия в виде ЦД [4] позволяет снизить риски выполнения ОКР по разработке высокотехнологичных образцов изделий на основе концепции системной инженерии [5] в составе: Система, ЖЦ, Заинтересованные стороны и новой концепции — ЦД изделий [2]. Концепции и принципы системной инженерии совместно дают обоснование метода системной инженерии, позволяющего сторонам и участникам определить: что, когда, как и с чем делать, чтобы создать изделие как систему с высокой степенью технологической сложности. Причем концепции — формируют мышление системного инженера, принципы — задают правила и нормы, тем самым обеспечивают обоснования метода системной инженерии, являющегося одновременно руководством и инструментом

для принятия реализации непротиворечивых решений на протяжении жизненного цикла [6].

Подходы к созданию ИВСТС от системного инжиниринга до цифровых двойников.

Системный инжиниринг или системная инженерия рассматривается, с одной стороны, как научно-методологическая дисциплина, изучающая и решающая проблемы проектирования и применения структурно сложных, крупномасштабных, человеко-машинных и социотехнических систем [6]. С другой стороны — в публикации [7] системная инженерия определяется как: «междисциплинарный подход к преобразованию потребностей пользователей в определение системы, ее архитектуру и дизайн посредством итеративного процесса, результатом которого является эффективная операционная система». Отсюда, разработчику ИВСТС необходимо применять методологию системного подхода, охватывающую как выявление, исследование и удовлетворение потребностей заказчика, так и определение технических показателей и характеристик, путей их обеспечения при реализации решений на всем ЖЦ с учетом стоимости и сроков изготовления. Ключевыми составляющими методологии системного подхода являются:

1. Определение цели или описание проблем создания системы;
2. Разработка требований и критериев, предъявляемых к системе;
3. Синтез системы;
4. Анализ системы;
5. Выбор системы;
6. Реализация системы [8].

Более подробно рассмотрим вторую, третью и четвертую составляющие, первую составляющую в части касающейся описания системы уже рассматривали в [9].

С третьей стороны по определению: «Системная инженерия — междисциплинарный подход, определяющий исчерпывающий набор технических и управленческих усилий, необходимых для преобразования совокупности потребностей заинтересованной стороны, ожиданий и ограничений в решение и для поддержки этого решения на протяжении его жизни» [10]. Следовательно решения создания ИВСТС на протяжении всего ЖЦ возможны, если скоординирована работа всех заинтересованных сторон, представляющих цели и задачи, и выполняющих

требования ТТЗ с учетом ограничений и целевых показателей.

Весь жизненный цикл системной инженерии показан в виде V-диаграммы в [5, 16] для демонстрации разбиения практик жизненного цикла системы на практики ее определения и воплощения. В соответствии с [16] сформируем V-диаграмму создания ИВСТС (рис. 1), где стейкхолдеры и заказчик — лица принимающие решения (ЛПР) вверху на правой ветви, обеспечивают возможности на левой ветви так что формируют или фокусируют внимание в соответствии с потребностями на набор требований для создания системы — ИВСТС. Потребности ЛПР, расположенные в левой верхней части V-диаграммы, фокусируют (определяют) требования в средней части левой ветви.

Далее требования определяют архитектуру, которая в свою очередь определяет не архитектурную часть, в нашем случае проектную и/или рабочую конструкторскую документацию (РКД) [11] на макет и/или опытный образец и рабочую технологическую документацию (ТД) [12]. Таким образом на левой ветви V-диаграммы имеем «водопад запросов» идущий от нужд ЛПР до конструкторско-технологической документации (ветвь Анализ — Определение), имеющий следующие составляющие и их функции, где стейкхолдеры определяют требования, которые определяют, архитектуру, которая определяет структуру, которая определяет не архитектурные инженерные решения, они определяют РКД, которая определяет ТД, которая обеспечивает изготовление изделия (опытный образец). На правой ветви V-диаграммы ЛПР устанавли-

вают порядок использования и применения всей системы ИВСТС, в виде требований по реализации системы, которые валидированы с требованиями, архитектурой и структурой на левой ветви V-диаграммы соответственно. В свою очередь система ИВСТС имеет подсистемы, которые верифицированы с архитектурными решениями. Подсистемы содержат части декомпозированные до уровня деталей, которые верифицированы с не архитектурными (инженерными) решениями в виде КД и ТД.

Таким образом «водопад запросов» ЛПР (Анализ и Определение) сбалансирован и имеет справа ответную часть в виде «лестницы синтеза» — воплощения (Синтез и Воплощение), необходимой для их реализации на каждом из соответствующих уровней: изготовление по ТД деталей; сборка по КД подсистемы и удовлетворение требований; сборка системы и удовлетворение требований; удовлетворение требований на порядок использования и применения.

Необходимо отметить, что V-диаграмма является следствием классической «Водопадной модели». Поэтому для разработки ИВСТС следует учитывать ситуации, когда проблема, упущенная на этапе формирования требований системы, обнаруживается на этапе внедрения. Тогда возникает потеря большого количества труда, на ее поиск и появление дополнительных затрат на доработку сложной системы. Главным недостатком является то, что требования формулируются до начала этапа разработки ИВСТС, что невозможно в силу сложности разрабатываемого изделия, так как в ходе проектирования ИВСТС существует в среднесрочном периоде высокая

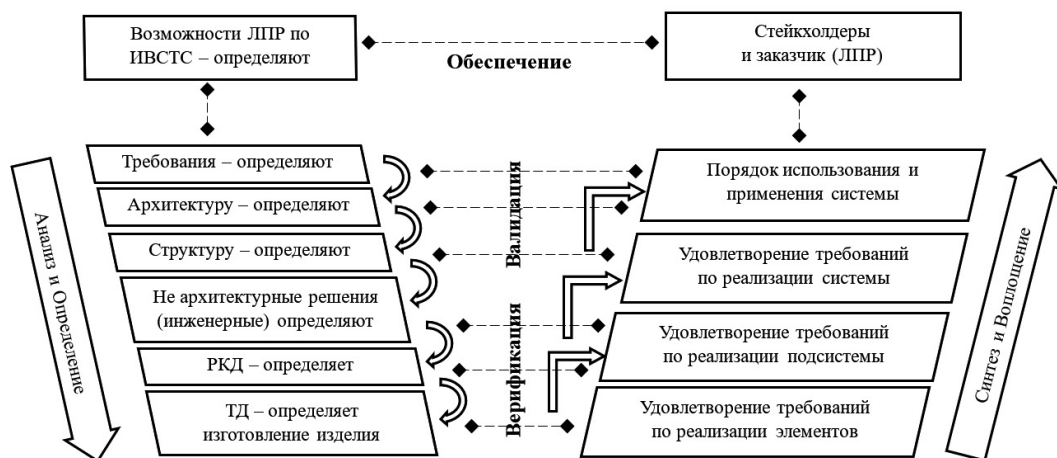


Рис. 1. Водопад запросов и лестница синтеза создания ИВСТС

динамика изменения требований по его применению и использованию.

Эту проблему по доработке системы частично решает «Итеративная водопадная модель», где по обратной связи можно сразу переработать фазу разработки с ошибкой. Существует «Спиральная модель» [13], где каждая итерация содержит: анализ требований, проектирование, разработку, тестирование, оценку рисков. Такая модель используется в разработке программного обеспечения для сложных и больших проектов, являющаяся сложной в применении и затратной в силу зависимости от анализа рисков. Основным преимуществом V-диаграммы является возможность проводить глубокую декомпозицию требований к ИВСТС с уровня мета на уровни мега, макро, мезо вплоть до уровней микро и даже до уровней внутренних свойств материалов [14, 15]. Это существенно важно на критических нагрузках и в закритических режимах работы изделия.

Для оценки категории «метод» в [16] выделяют: Системную инженерию — System Engineering, Системную разработку — System Implementation и Управление проектами/системами — Project / Systems Management, и назы-

вают «методами» (рис. 2). Где методы системной инженерии в совокупности представляют собой набор пересекающихся множеств, сфер деятельности системных инженеров и других специалистов, занятых созданием ИВСТС, которые состоят из взаимно пересекающихся подмножеств в виде облачных структур с подразделением на Системную инженерию, Системную разработку и Управление проектами/системами (УПС).

С целью проведения системно-логического анализа и построения V-диаграммы создания ИВСТС выделим на рис. 2 жирной рамкой следующие части, две ветви — левую и правую, а также перемычку между ними:

1. Левая ветвь в разделе Системная инженерия (СИ) набор методов: от Анализа потребностей и возможностей до Анализа развилки, моделирование и симуляции;

2. Правая ветвь в разделе Системная разработка (СР) аналогично: от Подготовки производства до Тестирования;

3. Перемычка в разделе, где пересекаются СИ+СР+УПС содержит: гарантии качества (QA), проверка и приемка (V&V), постоянные улучшения.

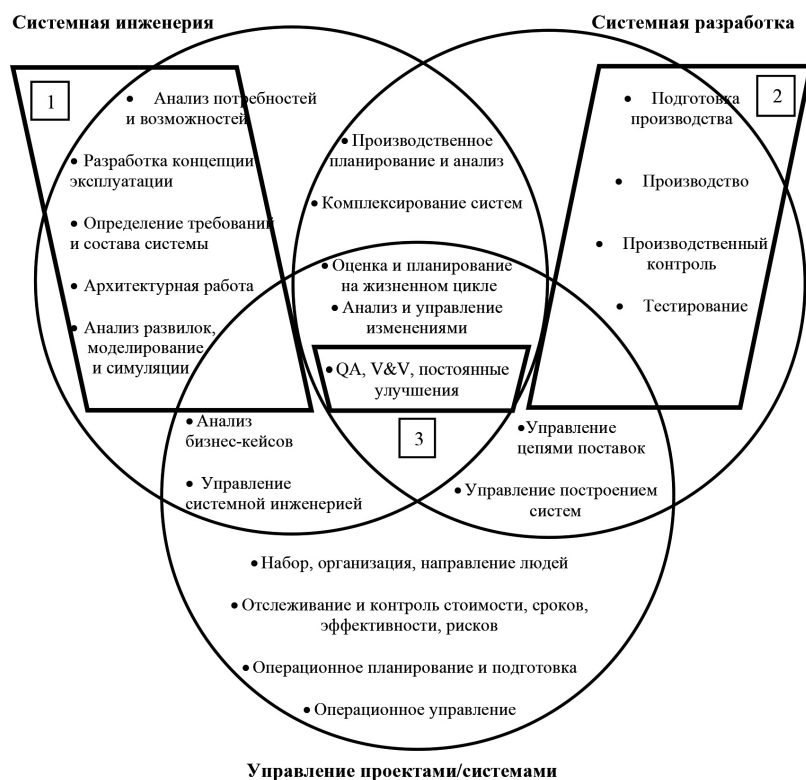


Рис. 2. Методы системной инженерии

Таким образом легко заметить, что ранее выделенные части: Системная инженерия и Системная разработка (СИ+СР) являются левой и правой частями V-диаграммы системной инженерии, которая используется для разработки сложных систем [16].

V-диаграмма создания ИВСТС на основе цифровых двойников.

Для эффективной работы создателей ИВСТС по всем каскадам «водопада запросов» — определения и «лестницы синтеза» — воплощения (рис. 1) потребуется координация и регламентация работы, включая установление постоянной обратной связи с лицами, принимающими решения — стейкхолдерами и заказчиками, которые нуждаются в требованиях, сфокусированных на их нуждах. Особенно это необходимо со стейкхолдерами с высоким уровнем важности и влияния. Поэтому, например Макс Кларксон, относит к первостепенным сторонам (стейкхолдерам) те из заинтересованных сторон, без чьего постоянного участия компания не сможет существовать [17].

С целью обеспечения требуемых свойств и характеристик на всем ЖЦ сформируем обобщенную V-диаграмму создания ИВСТС (рис. 3). На левой части диаграммы показано в нисходящей ветви «водопад запросов», на правой части в восходящей ветви — «лестница синтеза». Где, начиная с «водопада запросов», первоначально производится Анализ изготовления и возможностей создания ИВСТС (рис. 3). Потом происходит Разработка Концепции (ИВСТС), Определение требований и состава Системы, Архитектурная работа, Анализ развилки, моделирование и симуляции, Подготовка производства

ИВСТС), далее — Архитектурная работа (архитектура ИВСТС). После чего выполняется Анализ развилки, моделирование и симуляции (анализ развилки создания и моделирование использования, применения ИВСТС с учетом работы внутренних факторов и воздействия внешних факторов). Наконец Подготовка производства — разработка РКД и ТД завершает левую ветвь.

В основании диаграммы (по аналогии с Методами СИ, рис. 2) находятся Гарантии качества, проверка и приемка, постоянные улучшения, как процесс, в рамках которого разрабатывается РКД и ТД. В правой части диаграммы — восходящая ветвь «лестница синтеза». Сначала Производство (изготовление деталей, узлов и агрегатов ИВСТС в соответствии с РКД и ТД), далее выполняется Производственный контроль (валидация), Синтез (сборка ИВСТС) и Тестирование (верификация — приемка продукции [18]). В завершении правой ветви по результатам испытаний и приемки стейкхолдеры и заказчик принимают готовое ИВСТС и передают его в эксплуатацию потребителю, пользователю (рис. 3).

С целью улучшения системы необходимо вести работу с требованиями, начиная с анализа исходных данных. В случае, если применяется V-диаграмма для улучшения (модификации) системы и модификация системы инициируется на низком уровне системной иерархии левой ветви, то и система будет иметь меньший уровень соответствия требованиям стейкхолдера [19], в нашем случае — Заказчика на правой ветви. В случае проведения улучшений на более низких уровнях: Архитектурная работа или Анализ

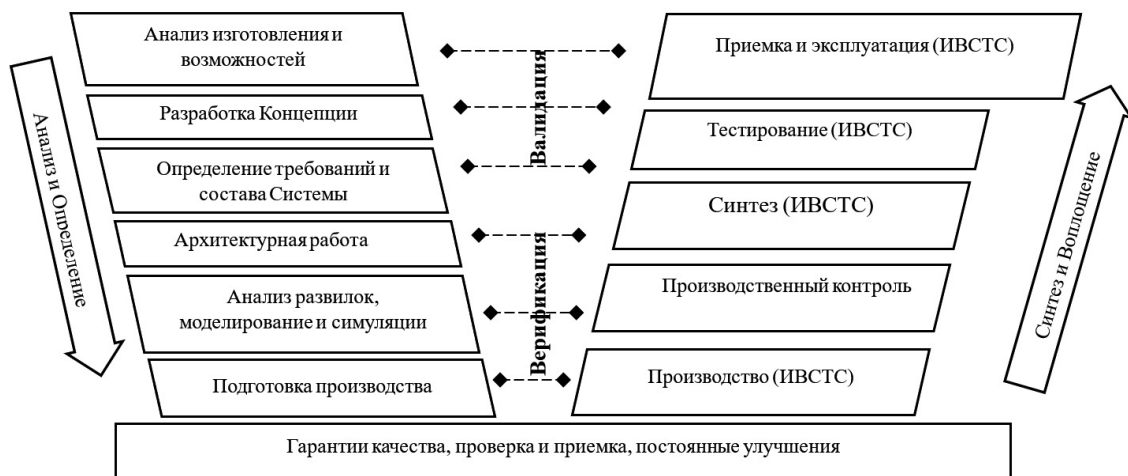


Рис. 3. V-диаграмма создания ИВСТС в системном инжиниринге

развилки, моделирование и симуляции, требуется соответственно изменение «родительских» требований системного уровня, что может породить создание новой подсистемы [17].

Поэтому процесс формирования требований должен содержать этап выявления заинтересованных сторон (стейкхолдеры, заказчик), и документирование их потребностей, включая условия и ограничения на всем ЖЦ [20]. Процесс управления требованиями, включая их изменения в соответствии с этапом ЖЦ, имеет особенности: исходные требования разрабатываются в ходе формирования концепции ИВСТС и аванпроекта; проектные требования уточняются на этапе эскизного проекта и дополняются на этапе технического проекта [21]. Разработку требований для ИВСТС в силу высокой степени сложности и необходимости их глубокой декомпозиции целесообразно вести в виде многоуровневой матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений на специальной цифровой платформе CML-Bench® [22]. Причем требования к ИВСТС могут быть как задокументированы, так и в виде цифровой модели изделия и/или его составных частей, могут быть представлены в виде многоуровневых матриц требований, целевых показателей и ресурсных ограничений цифровых двойников изделий [15].

Отметим, что для сложных наукоемких изделий создаются и поддерживаются компьютерные модели на основе методов аналитической и дифференциальной геометрии, алгебры логики и топологии, механики твердого тела, вычислительной математики и др., которые реализуются наилучшим образом с помощью ЦД, позволяющего ответить на два вопроса:

1. Что происходит с изделием сейчас?;
2. Что будет с изделием в будущем если на него будет оказано внешнее воздействие и/или произойдут внутренние изменения?

Здесь важен как процесс формирования матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений, описывающих изделие, также важно управление требованиями и на всей V-диаграмме. Это возможно применяя платформу CML-Bench® позволяющую «... осуществлять декомпозицию изделия как сложной технической/киберфизической системы на подсистемы, компоненты, узлы, детали и сборочные единицы,

осуществлять детализацию требований, формировать целевые показатели, учитывать ресурсные ограничения (в первую очередь технологические и производственные), проводить балансировку требований и целевых показателей ...» [22].

Таким образом V-диаграмма разработки ИВСТС должна основываться на многоуровневой матрице требований, целевых показателей и ресурсных ограничений на основе ЦД, что позволяет «... организовать процесс «цифровой сертификации» — специализированный бизнес-процесс, основанный на тысячах / десятках тысяч виртуальных испытаний как отдельных компонентов, так и всей системы в целом, целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натурных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний» [14]. Тем самым кратно сократить затраты на создание опытных образцов ИВСТС ВВСТ и принять их к серийному производству и далее в эксплуатацию и/или на снабжение с первого предъявления.

Заключение

Разработка ИВСТС ВВСТ на основе V-диаграммы системной инженерии и ЦД дает снижение временных, финансовых и иных ресурсных затрат в десять раз и более за счет заранее выявленных и декомпозированных требований, целевых показателей и ресурсных ограничений для архитектурных решений и оценки развилки, обеспечивает выполнение цифровой валидации и верификации ИВСТС ВВСТ при параллельной организации работ с натурными испытаниями, что является критичным для систем с высокой степенью технологической сложности, как по срокам создания и стоимости, так и по уровню ответственности разработчика за их работу в период эксплуатации и применения.

Литература

1. Стенограмма заседания дискуссионного клуба «Валдай». URL: <http://prezident.org/tekst/stenogramma-zasedaniya-diskussionnogo-kluba-valdai-05-10-2023.html> (дата обращения: 09.10.23).
2. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники

изделий. М.: Российский институт стандартизации. 2021. 15 с.

3. Боровков А. Цифровые двойники в условиях четвертой промышленной революции // Журнал «Connect WIT». 2021 № 01–02. С. 50–53. URL: https://www.connect-wit.ru/izdaniya-connect.html#flipbook-df_59223/52/ (дата обращения: 09.10.2023).

4. Кулемин В.Ю. К вопросу о системном инжиниринге при создании изделий высокой степени технологической сложности вооружения военной и специальной техники на основе цифровых двойников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 2 (127). С. 89–94.

5. ГОСТ Р 57193–2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ. 2016. 98 с.

6. Системная инженерия. Статья. Большая российская энциклопедия. <https://bigenc.ru/c/sistemnaia-inzheneriia-8275fd> (дата обращения: 11.10.2023).

7. Committee on Pre-Milestone A Systems Engineering, 2009, Pre-Milestone A and Early-Phase Systems Engineering: A Retrospective Review and Benefits for Future Air Force Acquisition, The National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/12065/pre-milestone-a-and-early-phase-systems-engineering-a-retrospective> (дата обращения: 05.10.2023).

8. Miles R.F., Systems Concepts. Wiley, New York, 1973. S. Ramo, R. St. Clair. The Systems Approach: Fresh Solutions to Complex Civil Problems Through Combining Science and Practical Common-Sense Hardcover — KNI, Incorporated, Anaheim, California, 1998. 248 p.

9. Кулемин В.Ю. К вопросу формирования замысла и описании при создании изделий высокой степени технологической сложности вооружения военной и специальной техники на основе цифровых двойников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 1 (131). 116–121.

10. ISO/IEC/IEEE 24765:2017. Systems and software engineering—Vocabulary.

11. ГОСТ 2.103–2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. М.: Стандартинформ. 2013. 8 с.

12. ГОСТ 3.1109–82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ. 2012. 15 с.

13. Barry Boehm. Spiral Development: Experience, Principles, and Refinements Article July 2000. URL: <https://www.researchgate.net/publication/235035976> (дата обращения: 07.12.23).

14. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Гамзикова А.А. Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении // Журнал «Neftegaz.Ru». 2020. № 6 (102). С. 35. URL: https://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2020/06_june/29/neftgaz-18-21.pdf (дата обращения: 25.10.23).

15. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография. Боровков А.И. [и др.]. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 492 с.

16. Электронный ресурс. V-диаграмма Systems Engineering Thinking Wiki (sewiki.ru) (дата обращения: 12.10.2023).

17. Clarkson M.E. A stakeholder framework for analyzing and evaluating corporate social performance//Academy of management review. 1995. Vol. 20. N. 1. Pp. 92–117 [Электронный ресурс] https://www.jstor.org/stable/258888?seq=1#page_scan_tab_contents (дата обращения: 14.09.22).

18. ГОСТ 15.309–98. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1998. 16 с.

19. ГОСТ Р 59194–2020 Управление требованиями. Основные положения. М.: Стандартинформ. 2020. 19 с.

20. Pyster A., Olwell D., Hutchison N., Enck S., Anthony J., Henry D. and Squires A. (eds). Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) version 1.0. Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology. 2012. 454 p.

21. ГОСТ Р 59193–2020 Управление конфигурацией. Основные положения. М.: Стандартинформ. 2020. 19 с.

22. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins). Испытания и приемка выпускаемой продукции. CML-Bench (часть 1) / А.И. Боровков [и др.] // САПР и графика. № 8. С. 42–51.