

УДК 004.9

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.024](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.024)

## Практика применения управления требованиями в области проблем на основе модельно-ориентированного системного инжиниринга наукоемких систем

И.О. Князева✉, Е.А. Кузнецова

*Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация*

**Резюме.** В традиционном подходе к разработке уделяется недостаточно внимания полноте охвата требований заинтересованных сторон к наукоемкой продукции и их качеству. Повсеместно внедряются процессы управления требованиями. Их применение с использованием методологии модельно-ориентированного системного инжиниринга (далее – MBSE) способствует всестороннему рассмотрению проектируемого продукта, позволяет избежать ошибок при его производстве и удовлетворить все требования заинтересованных сторон. Исследователи представляют разнообразные интерпретации данного процесса с использованием различных инструментов MBSE и программных сред высокоуровневого проектирования сложных систем. Представленная в работе практика является синтезом анализа и апробации подходов MBSE, и их успешного применения авторами в НИОКР при проектировании наукоемких систем. Уникальность представленного материала состоит в том, что он не ограничивается конкретными программными продуктами и подходит для последующих расширений, диктуемых предметной областью проектируемой системы. Целью исследования является описание практики применения управления требованиями в области проблем наукоемкой системы на основе MBSE. В процессе управления требованиями использовалась методология MBSE с применением языка моделирования архитектур систем SysML. В рамках исследования выявлены заинтересованные стороны, проведено их ранжирование по степени важности учета их требований в проекте. Проведено моделирование планируемых функциональностей и направлений разработки требований к системе. Выявлены требования в области проблем для рассматриваемого объекта разработки, в диаграмме требований SysML проанализированы их зависимости, требования верифицированы на предмет корректности составления и структурированы в табличном виде с присвоением атрибутов. Материалы статьи представляют структурированные этапы применения инструментов MBSE при выявлении требований в области проблем, которые возможно приложить к любой наукоемкой системе.

**Ключевые слова:** модельно-ориентированный системный инжиниринг, MBSE, управление требованиями, требования в области проблем, заинтересованные стороны, SysML.

**Благодарности:** исследование выполнено при поддержке федеральной программы академического лидерства «Приоритет-2030».

**Для цитирования:** Князева И.О., Кузнецова Е.А. Практика применения управления требованиями в области проблем на основе модельно-ориентированного системного инжиниринга наукоемких систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1445> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.024

# Practice of requirement management application in the problem domain based on model-driven system engineering of high-tech systems

I.O. Knyazeva✉, Ye.A. Kuznetsova

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, the Russian Federation*

**Abstract.** Insufficient attention is paid to the stakeholder requirements coverage and their quality in the traditional approach regarding the development of high-tech products. Requirement engineering is widely being implemented. Its application based on the MBSE methodology contributes to a comprehensive consideration of the designed product, helps to avoid errors in its production, and satisfies all stakeholder requirements. Researchers present various interpretations of this process using different MBSE tools and high-level design software for complex systems. The practice presented in this paper is a synthesis of analysis and validation of MBSE approaches as well as their successful application by the authors in R&D when designing high-tech systems. The presented material is unique not only because it is limited to specific software products and, but also due to being suitable for subsequent extensions dictated by the subject domain of the designed system. The purpose of the study is to describe the practice of applying requirement management in the field of problems of a knowledge-intensive system based on MBSE. In requirement engineering process, the MBSE methodology was utilized by means of the System Modeling Language (SysML) for architectural system modeling. Within the scope of the research, stakeholders were identified and ranked according to the importance of their requirements in the project. The planned functionalities and directions for system requirement development were modelled. Requirements in the problem domain were identified, and their dependencies were analyzed in a SysML requirements diagram. The requirements were verified for correctness and structured in tabular form with assigned attributes. The materials of the article present structured stages of MBSE tool application for requirements identification in the problem domain, which can be applied to any knowledge-intensive system.

**Keywords:** Model-Based Systems Engineering, MBSE, requirement engineering, problem domain requirements, stakeholders, SysML.

**Acknowledgements:** this research was supported by the Federal Academic Leadership Program “Priority-2030”.

**For citation:** Knyazeva I.O., Kuznetsova Ye.A. Practice of requirement management application in the problem domain based on model-driven system engineering of high-tech systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1445> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.024 (In Russ.).

## Введение

Зачастую проблемы в разработке выявляются на стадии производства продукта, когда на их исправление необходимо затратить большее количество ресурсов, чем на ранних этапах разработки. Возникновение подобной ситуации возможно вследствие ряда факторов: каждая из заинтересованных сторон проекта имеет свое видение продукта; не все требования к продукту определены; требования не согласованы между всеми заинтересованными сторонами; требования к продукту не были задокументированы. Вышеперечисленное характерно для традиционного документо-ориентированного подхода [1], который является преобладающим в большинстве выполняемых НИОКР. Он основывается на последовательном выполнении заранее определенных этапов в процессе разработки продукта с последующим документированием и принятием решений на основании выпущенных документов. Подход не является гибким, так как не предусматривает легкую адаптацию к изменениям

и зачастую не выходит за границы технического задания в поисках дополнительных требований к продукту.

Для решения выделенных ранее проблем рекомендуется применять процесс управления требованиями. Управление требованиями концентрируется на определении и документировании системных требований на ранней стадии разработки, подготовке проекта системы и ее проверке на соответствие требованиям по эксплуатации, созданию, стоимости, утилизации и иным.

Э. Халл, К. Джексон и Дж. Дик ввели разделение процесса разработки требований на разработку требований в области проблем и разработку требований в области решений [2]. Данный подход будет использован авторами. Требования в области проблем являются результатом анализа потребностей заинтересованных сторон, требования в области решений – результатом анализа и декомпозиции требований в области проблем, а также результатом деятельности по проектированию и конструированию.

Ориентация на требования также является фундаментом методологии модельно-ориентированного системного инжиниринга (Model-Based Systems Engineering, MBSE), представляющей собой широкий спектр формирования и применения описаний объектов в виде моделей.

Методология MBSE строит процесс проектирования, основываясь на моделировании предметной области как на основном источнике коммуникаций между участниками рабочей группы проекта, сводя к минимуму документо-ориентированный подход. В процессе управления требованиями проектирование системных архитектур сопутствует разработке требований, способствуя их выявлению, анализу и последующей верификации и валидации [3].

Управление требованиями с использованием методологии MBSE возможно приложить к любой наукоемкой системе, сложность которой требует всестороннего рассмотрения ее окружения и функционального взаимодействия. Наукоемкая система – это система, в которой научные знания и технологии играют ключевую роль в ее разработке, функционировании и совершенствовании. Она характеризуется высоким уровнем сложности, инновационностью и зависимостью от научных исследований. Особенностью наукоемких систем является необходимость постоянного научного исследования и развития, чтобы оставаться конкурентоспособными и соответствовать современным требованиям.

В качестве объекта исследования в настоящей работе рассматривается водородный бак высокого давления для использования в водородных топливных элементах на железнодорожном транспорте. Настоящий проект является инициативной разработкой.

Водородная энергетика сегодня является одной из самых перспективных областей развития альтернативной энергетики. Эта тема постоянно поднимается на ведущих мировых форумах [4], в том числе она важна и для железнодорожного транспорта. Главной стратегической целью Международного союза железных дорог является формирование условий для безуглеродной эксплуатации поездов к 2050 году [5].

Целью исследования является описание практики применения управления требованиями в области проблем наукоемкой системы на основе MBSE. Задачами исследования будут являться определение контекста проекта, идентификация списка заинтересованных сторон, их ранжирование по шкале важности и составление реестра заинтересованных сторон, построение Use Case диаграммы для определения направления разработки требований и разработка требований в области проблем с присвоением атрибутов каждому из требований.

## Материалы и методы

На Рисунке 1 обобщенно представлен порядок действий по выявлению и документированию требований относительно настоящего проекта.

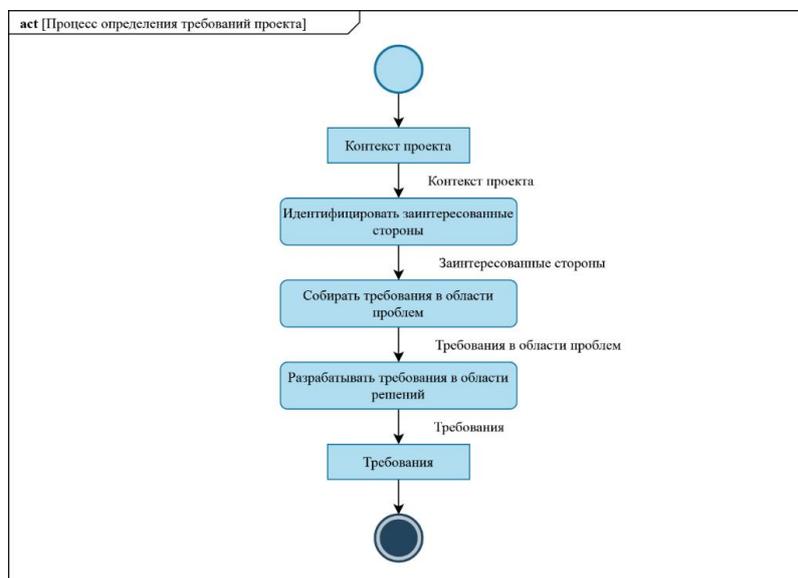


Рисунок 1 – Процесс определения требований проекта  
Figure 1 – Project requirements elicitation process

В рамках данной работы рассматривается контекст проекта, идентификация заинтересованных сторон и сбор требований в области проблем.

Для определения перечня заинтересованных сторон, которые должны участвовать в постановке требований, было выполнено ранжирование по шкале важности при помощи экспертных оценок.

Для определения направлений формирования требований было проведено интервьюирование заинтересованных сторон.

В исследовании авторами применяется методология MBSE, управление требованиями и язык моделирования архитектуры систем SysML, в том числе диаграмма Use Case и диаграмма требований. Язык SysML позволяет создавать более точные и надежные модели систем, что помогает снижать риски и улучшать качество разработки и управления проектами [6].

## Результаты

На начальном этапе разработки изделия был описан контекст проекта, выделена его цель. Системные идеи и цели, а также среда должны быть известны всем участвующим сторонам, чтобы обеспечить принятие правильных решений и мер на пути к готовой системе. Даже при нахождении в самом начале проекта, существует конкретное или абстрактное представление о решении. На данном шаге необходимо описать всю соответствующую информацию из контекста, особенно идеи и цели системы.

Целью проекта является производство композитных водородных резервуаров высокого давления для применения в железнодорожном транспорте. Актуальность работ в данном направлении обусловлена тем, что водород может быть использован в качестве экологически чистого топлива для производства электроэнергии. Одним из приоритетных направлений использования водородных топливных элементов является

железнодорожный транспорт. Международный союз железных дорог в соответствии с поставленными целями по обеспечению устойчивого развития железнодорожного транспорта прогнозирует снижение конечного потребления электроэнергии к 2030 году на 30 %, и это с учетом роста объема перевозок. В отчете ОАО «РЖД» об устойчивом развитии говорится, что за 2021 год на тягу поездов пришлось 44 735,5 млн. кВт·ч электрической энергии и 2367,6 тыс. тонн дизельного топлива [7]. Приоритетной задачей для железнодорожного транспорта является полная декарбонизации поставок электроэнергии. Данная задача не является исключительно отраслевой, но в значительной степени зависит от энергетического баланса стран. При определении экологических последствий деятельности железнодорожного транспорта в нашей стране на данный момент углеводородные характеристики источников поставок энергии не учитываются, хотя известно, что большая часть энергии даже в России, несмотря на существенную долю гидроэлектростанций (17 %) и атомных электростанций (19 %), вырабатывается на тепловых электростанциях с потреблением угля, нефти и соответствующими выбросами, загрязняющими атмосферу [8]. Глобальная поддержка процесса декарбонизации странами мира ставит на передний план снижение углеродного следа и энергопереход к более безопасным и экологически чистым источникам энергии. В данных условиях складывается иная модель современного глобального энергетического рынка, которая предусматривает развитие новых участников, ориентированных на возобновляемые источники энергии [9].

Для успеха проекта решающее значение имеет достаточное удовлетворение потребностей всех возможных заинтересованных сторон. Все лица и организации, которые могут быть заинтересованы в проекте, одинаково важны. Именно заинтересованные стороны являются источниками требований к продукту. Их интересы необходимо описывать и анализировать.

Для учета в проекте полного и достаточного перечня заинтересованных сторон, их влияния на реализацию проекта, авторами были рассмотрены источники, предлагающие свою интерпретацию перечня заинтересованных сторон проекта (Таблица 1).

Таблица 1 – Перечни заинтересованных сторон в разных стандартизирующих документах  
Table 1 – Lists of stakeholders in various standardization documents

ГОСТ Р 59194-2020 «Управление требованиями. Основные положения»	PMBoK (Project Management Body of Knowledge) [10]	Международный совет по системной инженерии INCOSE [11]
<ul style="list-style-type: none"> <li>– заказчик;</li> <li>– головной исполнитель программы;</li> <li>– поставщик;</li> <li>– разработчик;</li> <li>– головной разработчик;</li> <li>– изготовитель;</li> <li>– головной изготовитель;</li> <li>– эксплуатирующая организация;</li> <li>– надзорные и регулирующие органы;</li> <li>– ремонтные органы.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– спонсор проекта;</li> <li>– заказчик проекта;</li> <li>– пользователи;</li> <li>– поставщики и подрядчики;</li> <li>– деловые партнеры;</li> <li>– подразделения организации;</li> <li>– функциональные руководители;</li> <li>– снабженческие организации;</li> <li>– финансовые организации;</li> <li>– правительственные регулирующие органы;</li> <li>– эксперты по предметной области;</li> <li>– консультанты.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– руководство;</li> <li>– инвесторы;</li> <li>– пользователи системы;</li> <li>– обслуживающий персонал;</li> <li>– утилизаторы;</li> <li>– обучающий персонал;</li> <li>– покупатели;</li> <li>– маркетинг и продавцы;</li> <li>– эксперты по эргономике и эффективности;</li> <li>– эксперты по области применения;</li> <li>– правительство;</li> <li>– стандартизирующие органы;</li> <li>– общественное мнение.</li> </ul>

При определении круга заинтересованных сторон были даны ответы на следующие вопросы:

1. Кому интересна система?
2. Что случится, если мы не учтем то или иное заинтересованное лицо и его интересы?
3. Кто будет пользоваться системой?
4. Чьи действия могут привести к недостижению целей проекта?
5. Кто будет обеспокоен, если система выйдет из строя?

Представленный список вопросов не является конечным. Используя представленную логику, вопросы возможно дополнять в соответствии с областью применения проектируемой системы.

Рекомендуется иметь много потенциальных заинтересованных сторон в списке, чем пропустить одну из них. Забытая заинтересованная сторона может появиться незадолго до или после завершения проекта и внести важные требования, которые необходимо соблюдать, и которые система еще не покрывает. Это может привести к внесению критических изменений в проект, стоимость которых увеличивается на каждом этапе жизненного цикла проекта.

После определения перечня заинтересованных сторон проекта были расставлены приоритеты, которые определяют, участвует ли каждая из сторон в формулировании требований к системе. В настоящей работе использовалась шкала важности. Шкала важности была сформирована следующим образом: выбран числовой промежуток от 1 (низкая важность) до 5 (высокая важность), задан следующий вопрос о каждой заинтересованной стороне из списка: «Насколько высок риск провала проекта, если не учесть эту заинтересованную сторону и ее интересы?». Для ранжирования заинтересованных сторон был использован метод мозгового штурма с последующими экспертными оценками. В качестве экспертов выступали практикующие специалисты в области системной инженерии, ведущие инженеры и конструкторы с опытом проектной разработки от двух лет, научные сотрудники, а также кандидаты технических наук в отраслях науки, соответствующих тематике проекта, входящих в проектную группу. Далее на основании полученных оценок была получена средняя по каждой заинтересованной стороне с округлением до целого числа. Если по отношению важности кого-либо из сторон нет полной уверенности, в данном случае единственным верным выходом является выбор наиболее высокого приоритета для данного заинтересованного лица. Это гарантирует, что заинтересованное лицо не будет упущено, поскольку изначально предполагается, что у всех заинтересованных лиц есть важные требования. Результаты были отражены в реестре заинтересованных сторон, который также содержит в себе информацию необходимую в проекте (Таблица 2).

Таблица 2 – Реестр заинтересованных сторон  
Table 2 – Stakeholder registry

Принадлежит <sup>1</sup>	ID <sup>2</sup>	Заинтересованная сторона (стейкхолдер) <sup>3</sup>	Роль <sup>4</sup>	Оценка важности заинтересованной стороны <sup>5</sup>	Участвует в постановке требований <sup>6</sup>	Ф.И.О., должность, контактная информация и дополнительная информация о представителе роли <sup>7</sup>
-	St1	Руководство	– обоснование и представление целей проекта; – представление требований к продукту	5	Да	-
St1	St2	Изготовитель	– разработка и изготовление продукта; – обслуживание в период эксплуатации	4	Да	-
-	St3	Эксплуатирующая организация	– представление требований к продукту; – функциональное сопровождение результатов проекта	5	Да	-
-	St4	Надзорные и регулирующие органы	– осуществление контрольно-надзорных функций	5	Да	-

<sup>1</sup> Указывается ID стейкхолдера-родителя. Используется в случае, если необходимо показать связь стейкхолдеров.

<sup>2</sup> ID – обязательный буквенно-цифровой идентификатор элементов процесса инженерии требований, благодаря которому будут определяться связи для выявления проектных и системных требований продукта.

<sup>3</sup> Роль стейкхолдера по отношению к продукту (системе).

<sup>4</sup> Функции, выполняемые в период реализации проекта.

<sup>5</sup> Оценка важности от 1 до 5, где 1 – наименьшая оценка важности, 5 – наибольшая.

<sup>6</sup> Участие (да/нет) заинтересованной стороны в выявлении требований к системе.

<sup>7</sup> Ф.И.О. представителя, имеющаяся контактная информация, предпочтительный способ связи и иная необходимая информация.

Для определения направления формирования требований были проведены интервью, проходил сбор документов, в том числе нормативных, использовался материал по уже созданным системам.

Для описания функциональности и направлений разработки требований к системе, была построена диаграмма Use Case в нотации SysML (Рисунок 2). В настоящей диаграмме в качестве акторов выступают идентифицированные заинтересованные стороны с общим представлением о рассматриваемой системе.

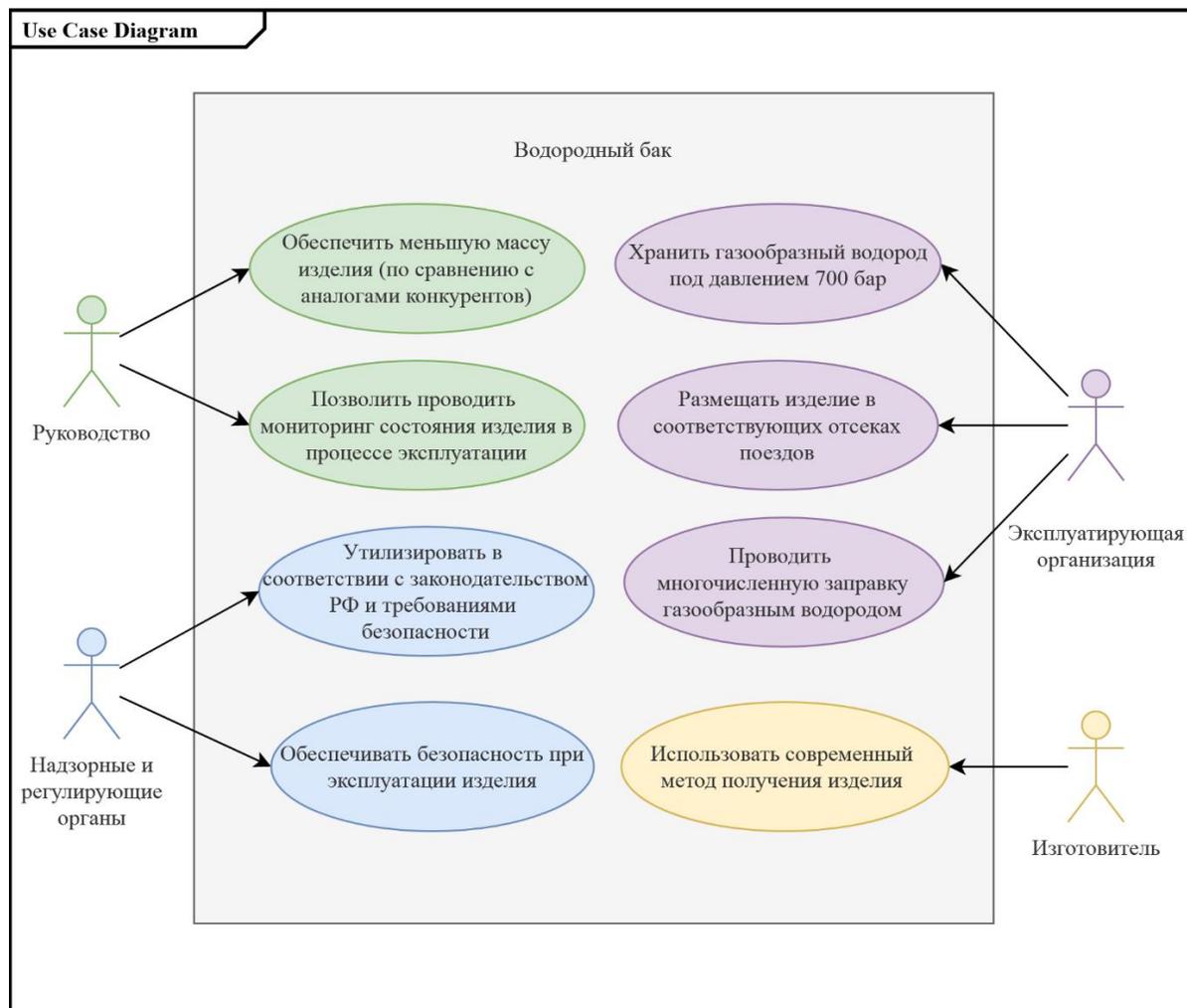


Рисунок 2 – Диаграмма Use Case  
Figure 2 – Use Case Diagram

Потребности заинтересованных сторон и требования документов по стандартизации могут быть связаны с назначением и функционированием объекта, процессом его разработки, изготовления, испытаний, эксплуатации, ремонта и иных.

Моделирование требований с помощью SysML означает не что иное как сохранение текста в стандартизированном формате и представление текстовых блоков в виде прямоугольников на диаграмме для визуализации их взаимосвязей (Рисунок 3). Так, на рисунке наглядно представлена зависимость родительских и дочерних требований, выявленных в ходе работы.

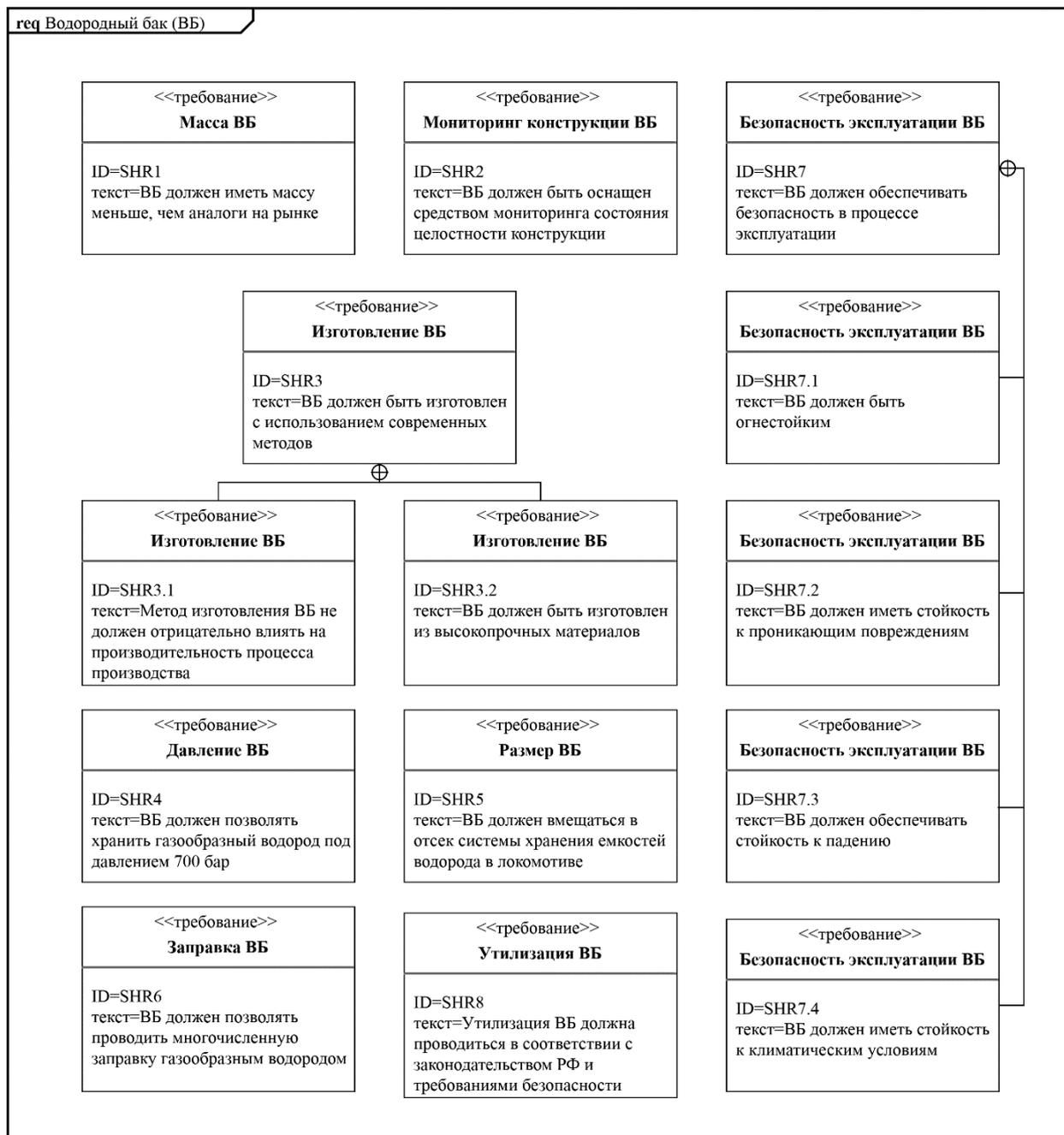


Рисунок 3 – Диаграмма требований  
Figure 3 – Requirements diagram

Согласно национальному стандарту РФ «Управление требованиями. Основные положения» все требования структурированы в табличном виде, для каждого из требований введены атрибуты, которые позволяют зафиксировать источники требований, обоснования необходимости фиксации требований, их приоритет, версии и статусы согласования (Таблица 3).

Таблица 3 – Требования в области проблем  
Table 3 – Requirements in the problem domain

Источник <sup>1</sup>	ID требования	Требование <sup>2</sup>	Обоснование <sup>3</sup>	Приоритет <sup>4</sup>	Версия <sup>5</sup>	Статус согласования <sup>6</sup>
St1	SHR1	Водородный бак должен иметь массу меньше, чем аналоги на рынке	Материал для изготовления бака должен быть легким, чтобы уменьшить массу бака и, как следствие, потребление топлива железнодорожным транспортом	Ключевое	1	
St1	SHR2	Водородный бак должен быть оснащен средством мониторинга состояния целостности конструкции	Отслеживание целостности конструкции водородного бака способствует безопасности эксплуатации, увеличению срока службы	Ключевое	1	
St2	SHR3	Водородный бак должен быть изготовлен с использованием современных методов	Настоящие требования направлены на изготовление продукта высокого качества без ухудшения производительности процесса производства	Ключевое	1	
	SHR3.1	Метод изготовления водородного бака не должен отрицательно влиять на производительность процесса производства		Необходимое	1	
	SHR3.2	Водородный бак должен быть изготовлен из высокопрочных материалов		Ключевое	1	
St3	SHR4	Водородный бак должен позволять хранить газообразный водород под давлением 700 бар	Из-за своей низкой плотности водород имеет очень низкое энергосодержание на единицу объема, вследствие чего для возможности его хранения и транспортировки необходимо его сжатие с высоким давлением	Ключевое	1	
St3	SHR5	Водородный бак должен вмещаться в отсек системы хранения емкостей водорода в локомотиве	Соблюдение настоящего требования позволит интегрировать водородный бак с другими компонентами и обеспечить компактность конструкции	Ключевое	1	

Таблица 3 (продолжение)  
Table 3 (extended)

Источник <sup>1</sup>	ID требования	Требование <sup>2</sup>	Обоснование <sup>3</sup>	Приоритет <sup>4</sup>	Версия <sup>5</sup>	Статус согласования <sup>6</sup>	
St3		SHR6	Водородный бак должен позволять проводить многочисленную заправку газообразным водородом	Настоящее требование направлено на поддержание экономической эффективности водородных баков	Ключевое	1	
St4		SHR7	Водородный бак должен обеспечивать безопасность в процессе эксплуатации	«Водородное охрупчивание» – проникновение водорода в металлическую решетку при определенных условия температуры и давления. При пожарах композитные материалы, используемые для резервуаров для хранения, могут разлагаться, и может произойти потеря удержания водорода. Это может привести к разрыву резервуара для хранения водорода с образованием взрывной волны, сопровождаемой огненным шаром	Ключевое	1	
		SHR7.1	Водородный бак должен быть огнестойким		Ключевое	1	
		SHR7.2	Водородный бак должен иметь стойкость к проникающим повреждениям		Ключевое	1	
		SHR7.3	Водородный бак должен обеспечивать стойкость к падению		Ключевое	1	
		SHR7.4	Водородный бак должен иметь стойкость к климатическим условиям		Ключевое	1	
St4		SHR8	Утилизация водородного бака должна проводиться в соответствии с законодательством РФ и требованиями безопасности	Защита окружающей среды и здоровья людей	Ключевое	1	

<sup>1</sup> ID заинтересованной стороны.

<sup>2</sup> Сформулированное требование в области проблем.

<sup>3</sup> Объяснение необходимости фиксации требования.

<sup>4</sup> Ключевое/необходимое/дополнительное/желательное.

<sup>5</sup> Номер версии требования начиная с 1.

<sup>6</sup> Согласовано/не согласовано.

Рекомендуется приводить обоснования для каждого из требований. Ценность обоснования состоит в том, что настоящий атрибут доказывает необходимость фиксации того или иного требования и в конечном счете будет использован для валидации конечного продукта.

При работе с требованиями необходимо многократное повторение выполнения процессов верификации и валидации. При этом стоит помнить о том, что в первую очередь верификация требований важна для исполнителя, а валидация для заинтересованных сторон.

Выполняя верификацию требований важно учесть принадлежность требований к разрабатываемому продукту, соответствие формулировок требований общепринятым стандартам, достаточность и корректность заполнения атрибутов требований. При валидации требований стоит обратить внимание на полноту покрытия спецификацией исходных требований всех потребностей заинтересованных сторон, правильность выражения каждым из требований потребности заинтересованной стороны, а также общую непротиворечивость требований в спецификации.

### Заключение

В работе описана практика применения процесса управления требованиями в области проблем на основе методологии MBSE в ходе разработки наукоемкой системы, которая, в свою очередь, взаимодействует с окружающим миром посредством отхода от документо-ориентированного подхода в сторону моделирования как основного источника для обмена информацией между участниками проекта. Описанная практика успешно применяется авторами при реализации НИОКР.

В качестве объекта применения инструментов управления требованиями и MBSE выступил водородный бак высокого давления для использования в водородных топливных элементах на железнодорожном транспорте. Водородная энергетика сегодня одна из самых перспективных областей развития альтернативной энергетики, выступающая экологически чистым топливом для производства электроэнергии. Водород требует использования специальных баков для обеспечения его безопасного хранения и транспортировки. Из-за своей низкой плотности газообразный водород имеет очень низкое энергосодержание на единицу объема, вследствие чего для возможности его хранения и транспортировки необходимо его сжатие с высоким давлением. Все это требует повышенного внимания к организации хранения и транспортирования водорода.

Процесс управления требованиями комплексно с методологией MBSE помогает выявлять и управлять требованиями от самого зарождения концепции до момента готовности продукта, разделяя требования на область проблем, где фиксируются требования широкого круга заинтересованных сторон проекта, и область решений, которая расширяет и уточняет круг требований на системные требования, требования к подсистемам и требования к компонентам.

В настоящей работе были представлены требования в области проблем с использованием инструмента SysML в части рассмотрения заинтересованных сторон, их ранжирования по степени важности учета их требований в проекте, функциональностей и направлений разработки требований к системе, анализа зависимостей требований и их верификации на предмет корректности составления, структурирование требований в табличном виде с присвоением атрибутов.

Настоящая работа является первой в цикле работ по описанию прикладного применения инженерии требований. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку требований в области решений, описание применения практик управления требованиями на этапах разработки водородного бака.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лукина С.В., Макаров В.М. Моделеориентированность в цифровых трансформациях машиностроения. *РИТМ машиностроения*. 2021;5:32–38.
2. Халл Э., Джексон К., Дик Дж. *Инженерия требований*. М.: ДМК Пресс; 2017. 218 с.
3. Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Давыденко Е.В., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем. *Труды МФТИ*. 2022;14(2):149–161.
4. Zhiznin S.Z., Shvets N.N., Timokhov V.M., Gusev A.L. Economics of hydrogen energy of green transition in the world and Russia. Part I. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;3. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369305253\\_ECONOMICS\\_OF\\_HYDROGEN\\_ENERGY\\_OF\\_GREEN\\_TRANSITION\\_IN\\_THE\\_WORLD\\_AND\\_RUSSIA\\_PART\\_I](https://www.researchgate.net/publication/369305253_ECONOMICS_OF_HYDROGEN_ENERGY_OF_GREEN_TRANSITION_IN_THE_WORLD_AND_RUSSIA_PART_I). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.069 (дата обращения: 22.03.2023).
5. Лapidус Б.М. Повышение энергоэффективности и перспективы использования водородных топливных элементов на железнодорожном транспорте. *Вестник ВНИИЖТ*. 2019;78(5):274–283.
6. Sint S., Mazak A., Geist V., Carpella C., Wimmer M. Thirteen years of SysML: a systematic mapping study. *Software and Systems Modeling*. 2020;19(4). URL: [https://www.researchgate.net/publication/333086120\\_Thirteen\\_years\\_of\\_SysML\\_a\\_systematic\\_mapping\\_study](https://www.researchgate.net/publication/333086120_Thirteen_years_of_SysML_a_systematic_mapping_study). DOI: 10.1007/s10270-019-00735-y (дата обращения: 22.03.2023).
7. Объемы потребления основных видов ТЭР в ОАО «РЖД» за 2020–2021 годы. URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/annexes/energy-efficiency> (дата обращения: 31.03.2023).
8. Российский статистический ежегодник. Росстат. М.: 2022. 691 с.
9. Ильинский А.А., Калинина О.В., Хасанов М.М. Декарбонизация нефтегазового комплекса: приоритеты и организационные модели развития. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2022;1:33–46.
10. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Newtown Square, PA: Project Management Institute; 2017. URL: [https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/a-guide-to-the-project-management-body-of-knowledge-6e\\_compressed.pdf](https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/a-guide-to-the-project-management-body-of-knowledge-6e_compressed.pdf) (дата обращения: 25.04.2023).
11. INCOSE. *Guide to Writing Requirements*. Opportunity Road, SD: International Council on Systems Engineering; 2023. URL: [https://www.incose.org/docs/default-source/working-groups/requirements-wg/gtwr/incose\\_rwg\\_gtwr\\_v4\\_040423\\_final\\_drafts.pdf?sfvrsn=5c877fc7\\_2](https://www.incose.org/docs/default-source/working-groups/requirements-wg/gtwr/incose_rwg_gtwr_v4_040423_final_drafts.pdf?sfvrsn=5c877fc7_2) (дата обращения: 25.04.2023).

## REFERENCES

1. Lukina S.V., Makarov V.M. Model-orientation in digital transformations of mechanical engineering. *RITM mashinostroeniya*. 2021;5:32–38. (In Russ.)
2. Hall E., Jackson K., Dick D. *Requirements Engineering*. Moscow, DMK Press; 2017. 218 p. (In Russ.)
3. Garichev S.N., Gorbachev R.A., Davydenko E.V., Dzhaparov B.A., Kondrat'ev V.V. Model-oriented engineering of physical, technical, information, and intelligent systems. *Trudy MFTI*. 2022;14(2):149–161. (In Russ.)
4. Zhiznin S.Z., Shvets N.N., Timokhov V.M., Gusev A.L. Economics of hydrogen energy of green transition in the world and Russia. Part I. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;3. [https://www.researchgate.net/publication/369305253\\_ECONOMICS\\_OF\\_HYDROGEN\\_ENERGY\\_OF\\_GREEN\\_TRANSITION\\_IN\\_THE\\_WORLD\\_AND\\_RUSSIA\\_PART\\_I](https://www.researchgate.net/publication/369305253_ECONOMICS_OF_HYDROGEN_ENERGY_OF_GREEN_TRANSITION_IN_THE_WORLD_AND_RUSSIA_PART_I)

- [ORLD AND RUSSIAPART I](#). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.069 (accessed on 22.03.2023).
5. Lapidus B.M. Increased energy efficiency and prospects for the use of hydrogen fuel cells in railway transport. *Vestnik VNIIZhT*. 2019;78(5):274–283. (In Russ.).
  6. Sint S., Mazak A., Geist V., Carpella C., Wimmer M. Thirteen years of SysML: a systematic mapping study. *Software and Systems Modeling*. 2020;19(4). [https://www.researchgate.net/publication/333086120\\_Thirteen\\_years\\_of\\_SysML\\_a\\_systematic\\_mapping\\_study](https://www.researchgate.net/publication/333086120_Thirteen_years_of_SysML_a_systematic_mapping_study). DOI: 10.1007/s10270-019-00735-y (accessed on 22.03.2023).
  7. Consumption volumes of major types of energy resources at Russian Railways JSC in 2020–2021. URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/annexes/energy-efficiency> (accessed on 31.03.2023). (In Russ.).
  8. Russian Statistical Yearbook. Rosstat. Moscow, 2022. 691 p. (In Russ.).
  9. Pyinsky A.A., Kalinina O.V., Khasanov M.M. Decarbonization of the oil and gas complex: priorities and organizational models of development. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka*. 2022;1:33–46. (In Russ.).
  10. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Newtown Square, PA: Project Management Institute; 2017. URL: <https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/a-guide-to-the-project-management-body-of-knowledge-6e-compressed.pdf> (accessed on 25.04.2023).
  11. INCOSE. *Guide to Writing Requirements*. Opportunity Road, SD: International Council on Systems Engineering; 2023. URL: [https://www.incose.org/docs/default-source/working-groups/requirements-wg/gtwr/incose\\_rwg\\_gtwr\\_v4\\_040423\\_final\\_drafts.pdf?sfvrsn=5c877fc7\\_2](https://www.incose.org/docs/default-source/working-groups/requirements-wg/gtwr/incose_rwg_gtwr_v4_040423_final_drafts.pdf?sfvrsn=5c877fc7_2) (accessed on 25.04.2023).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Князева Ирина Олеговна**, аспирант кафедры Системного анализа и исследования операций, процессный аналитик Научной лаборатории «Системная инженерия и цифровизация», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация  
*e-mail*: [knio95@mail.ru](mailto:knio95@mail.ru)  
ORCID: [0000-0001-6632-0670](https://orcid.org/0000-0001-6632-0670)

**Irina O. Knyazeva**, Postgraduate Student, the Department of System Analysis and Operation Research, Process Analyst at System Engineering and Digitalization Scientific Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

**Кузнецова Евгения Александровна**, и.о. заведующего кафедрой Системного анализа и исследования операций, научный сотрудник Научной лаборатории «Системная инженерия и цифровизация», Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Российская Федерация  
*e-mail*: [kuznetsova\\_ea@mail.sibsau.ru](mailto:kuznetsova_ea@mail.sibsau.ru)  
ORCID: [0000-0002-3559-8394](https://orcid.org/0000-0002-3559-8394)

**Yevgeniya A. Kuznetsova**, Acting Head of the System Analysis and Operations Research Department, Research Fellow at System Engineering and Digitalization Scientific Laboratory, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 25.09.2023; одобрена после рецензирования 09.11.2023;  
принята к публикации 18.12.2023.*

*The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 09.11.2023;  
accepted for publication 18.12.2023.*