

*Научная статья*

УДК 519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Жанна Бурлутская\*<sup>id</sup>, Полина Шарко<sup>id</sup>, Карина Лундаева<sup>id</sup>, Сальбек Бекетов<sup>id</sup>

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [zhanna.burlutskaya@spbpu.com](mailto:zhanna.burlutskaya@spbpu.com), [polina.sharko@spbpu.com](mailto:polina.sharko@spbpu.com), [karina.lundaeva@spbpu.com](mailto:karina.lundaeva@spbpu.com), [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)

\*Автор, ответственный за переписку: [zhanna.burlutskaya@spbpu.com](mailto:zhanna.burlutskaya@spbpu.com)

### Аннотация

Данная работа посвящена исследованию организационной системы технологических процессов, включая выделение типовых агентов, их целевых функций и стратегий взаимодействия друг с другом в процессе функционирования системы. В рамках данного исследования предлагается рассмотрение системы технологических процессов как сложной организационной системы междисциплинарной природы с соответствующими ей особенностями, включая множественность целевых функций, внутреннюю неопределенность, распределенное управление и ограниченную рациональность социальных элементов. Целью работы является разработка метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах. В ходе работы приводится описание типовых агентов системы технологических процессов, их задач и целевых функций. Результатом работы является онтологическая модель организационной системы технологических процессов, а также метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на ее основе. В рамках апробации предложенного метода приводится разработка модели системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли. На следующих этапах исследования планируются разработка и программная реализация алгоритмов оптимизации технологических процессов на базе мультиагентного подхода, основанных на гибридном моделировании систем технологических процессов как совокупности процессов, моделируемых с использованием имитационного моделирования, и организационной системы интеллектуальных агентов, осуществляющих управление процессами, с использованием мультиагентного подхода.

**Ключевые слова:** сложные системы, мультиагентные взаимодействия, технологические процессы, имитационное моделирование, интеллектуальные агенты.

**Цитирование:** Бурлутская, Ж., Шарко, П., Лундаева, К., Бекетов, С., 2025. Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Бурлутская Ж., Шарко П., Лундаева К., Бекетов С., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*Research Article*

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

## METHOD OF MODELING MULTI-AGENT INTERACTIONS IN COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESSES

Zhanna Burlutskaya\*, Polina Sharko, Karina Lundaeva, Salbek Beketov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, karina.lundaeva@spbpu.com, salbek.beketov@spbpu.com

\* Corresponding author: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

### Abstract

This work is devoted to the study of the organizational system of technological processes, including the identification of typical agents, their target functions and strategies for interacting with each other during the functioning of the system. Within the framework of this study, it is proposed to consider the system of technological processes as a complex organizational system of an interdisciplinary nature with its corresponding features, including a multiplicity of target functions, internal uncertainty, distributed management and limited rationality of social elements. The aim of the work is to develop a method for modeling multi-agent interactions in complex technological processes. In the course of the work, the description of typical agents of the technological process system, their tasks and target functions are given. The result of the work is an ontological model of the organizational system of technological processes, as well as a method for modeling multi-agent interactions in complex technological processes based on it. As part of the approbation of the proposed method, a model of the technological process system in the oil and gas industry is developed. At the next stages of the study, it is planned to develop and programmatically implement algorithms for optimizing technological processes based on a multi-agent approach based on hybrid modeling of technological process systems as a set of processes modeled using simulation modeling and an organizational system of intelligent agents managing processes using a multi-agent approach.

**Keywords:** complex systems, multi-agent interactions, technological processes, simulation modeling, intelligent agents.

**Citation:** Burlutskaya Z., Sharko P., Lundaeva K., Beketov S., 2025. Method of modeling multi-agent interactions in complex technological processes. Sustainable Development and Engineering Economics 4, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Burlutskaya, Z., Sharko, P., Lundaeva, K., Beketov, S., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

## 1. Введение

Системы технологических процессов относятся к сложным организационным системам междисциплинарной природы, в которых взаимодействует множество социальных и технических агентов с различными целями, функциями и стратегиями поведения. Для того чтобы принимать обоснованные управленческие решения по управлению технологическими процессами, необходимы специализированные инструменты поддержки принятия решений, способные учитывать ключевые особенности исследуемых систем: фактическую мультиагентность, множественность целевых функций, стохастическую природу многих параметров и внутреннюю неопределенность (Ayhan et al., 2015). Однако существующие инструменты зачастую оказываются ограниченными, так как опираются на упрощенные модели и не позволяют адекватно описывать всю полноту организационных и технологических взаимосвязей (Bolsunovskaya et al., 2022). Во-первых, они, как правило, игнорируют мультиагентную природу технологических процессов, предполагая наличие единого центра управления и не учитывая разнообразие участников и форм их взаимодействия (Voccella et al., 2020). Во-вторых, большинство инструментов ориентировано на оптимизацию по одному критерию, тогда как реальные системы требуют поиска баланса между множеством целевых функций (производительностью, затратами, безопасностью, устойчивостью функционирования и пр.) (Cerdea-Flores et al., 2022). В-третьих, используемые модели часто не способны адекватно описывать неопределенность, возникающую как вследствие неполноты исходных данных, так и из-за стохастической природы процессов (Gintsyak et al., 2023). Кроме того, они опираются преимущественно на статическое представление системы, что снижает возможность учитывать динамику и изменчивость внешней среды (Termine et al., 2023). Наконец, существующие инструменты редко интегрируют технические, организационные и экономические аспекты, что ограничивает их применимость в комплексных задачах управления. Соответственно, существует проблема ограниченности настоящих подходов к моделированию сложных производственных систем в части учета фактических мультиагентных взаимодействий и соответствующей множественности целевых функций, неопределенности и динамического характера системы (Gorodetskii, 2012). В рамках настоящего исследования предлагается рассматривать систему технологических процессов как организационную систему междисциплинарной природы. Система технологических процессов понимается как совокупность технических и социальных элементов, взаимодействующих для реализации организационно-экономических и технических процессов с целью достижения общих результатов (Burlankov et al., 2017). Такая система относится к классу организационных систем, так как представляет собой упорядоченную структуру, в которой согласованно функционируют дифференцированные и автономные части, реализуются процессы, обеспечивающие взаимодействие между ними, и объединяются люди, совместно достигающие целей на основе установленных процедур и правил (Tsoukanov & Voeva, 2012).

Рассмотрение системы технологических процессов в качестве организационной системы позволяет разработать онтологическую модель, описывающую типовых агентов и их взаимодействия, а также предложить метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах (Burlutskaya, 2024a; Foit, 2022).

Таким образом, целью исследования является разработка метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на основе онтологической модели организационной системы технологических процессов.

Практическая апробация предложенного метода выполнена на примере моделирования системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли, что подтверждает его применимость для реальных отраслевых производственных систем.

## 2. Материалы и методы

В данном исследовании в качестве основного метода применяется моделирование мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах с использованием парадигмы моделирования интеллектуальных агентов BDI (Belief–Desire–Intention). Использование модели интеллектуальных агентов BDI направлено на формализацию поведения агентов на основе их убеждений (beliefs), целей (desires) и намерений (intentions) (Huber, 1999; Winikoff & Sidorenko, 2023), обеспечивая возможность учета мультиагентности, множественности целевых функций и динамического характера процессов.

Под интеллектуальными агентами понимаются агенты, обладающие собственным развивающимся набором знаний, стратегиями поведения и целями, способные воспринимать и реагировать на окружающую среду, а также создавать новые или усовершенствованные сценарии действий на основании знаний о предметной области и поведении других агентов (Chernyshev, 2023; Gorodetsky et al., 2019; Wooldridge, 2009). Системы интеллектуальных агентов, взаимодействующих как с внешней средой, так и друг с другом, представляют собой мультиагентные системы (MAS) (Ding et al., 2023; Calegari et al., 2021; Boissier et al., 2020).

Взаимодействие агентов, а значит, и их результирующее совместное поведение могут иметь различные цели (Sharko & Burlutskaya, 2025; Gorodetsky et al., 2019). Агенты MAS могут взаимодействовать с целью кооперативного решения некоторой общей сложной или крупномасштабной задачи. Другой характер взаимодействия агентов реализуется в случае, когда каждый агент имеет свои цели, однако он по каким-либо причинам не в состоянии решить задачу самостоятельно, а потому вынужден прибегать к помощи других агентов (Wooldridge, 2009).

Особенности общения агентов, в частности вариативность парадигм общения и тип взаимодействия, во многом определяются характеристиками реальных агентов. Так, для социальных агентов технологических процессов будет характерна ограниченная рациональность, возникающая из-за ограниченного доступа к информации о системе и несогласованности собственных и глобальных целей системы (Pospelov, 2025; Pospelov & Gintciak, 2025). Таким образом, в реальных системах характер взаимодействия агентов может меняться в зависимости от результатов анализа состояния среды интеллектуальными агентами.

Характер взаимодействия и парадигмы общения определяются в рамках моделирования организационной MAS (Sharko & Burlutskaya, 2025).

В рамках исследования рассматриваются такие типовые агенты технологических систем, как Предприятие, Производственное подразделение, Обслуживающее подразделение и Производственная площадка. Убеждения, желания и намерения в рамках централизованного и децентрализованного управления на уровне рассматриваемого агента каждого из выделенных агентов представлены далее.

Агент Предприятие представлен как ключевой управляющий элемент системы технологических процессов. Его убеждения включают набор обеспечивающих ресурсов, структурных

подразделений, текущие задачи подразделений, запросы на получение ресурсов, условия действующих договоров с ближним окружением, а также запросы и требования внешней среды (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020). Основные желания Предприятия направлены на максимизацию скорости выполнения условий договора с заказчиком, обеспечение высокого качества продукции и минимизацию расходов. В рамках централизованного управления агент реализует последовательность действий, включающую осведомление о ходе выполнения заказа, принятие решений о пересмотре условий договора совместно с заказчиком, уведомление руководителей структурных подразделений об изменениях сроков выполнения заказов, корректировку плана производства, определение и доведение задач до структурных подразделений, фиксирование и исполнение требований внешней среды, а также информирование о нарушениях со стороны участников коммуникации.

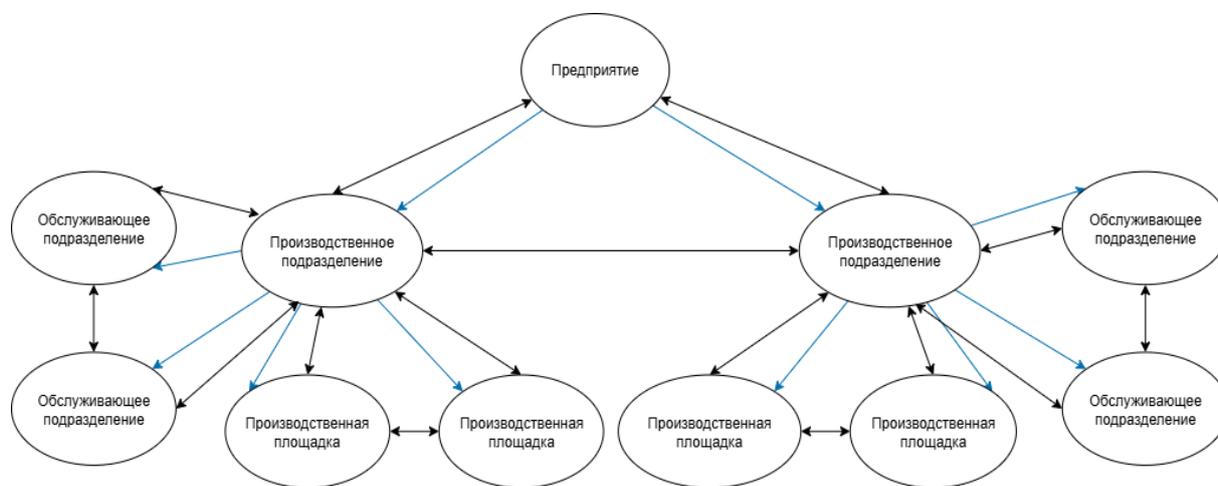
Агент Производственное подразделение функционирует как ключевой исполнитель внутри предприятия. Его убеждения включают текущие задачи подразделения и наличие ресурсов для их выполнения. Основные желания агента направлены на максимизацию скорости выполнения задач, поставленных предприятием, а также обеспечение высокого качества продукции. В рамках централизованного управления агент выполняет следующие действия: получает задание от предприятия, по запросу информирует предприятие о ходе выполнения заказа, уведомляет предприятие о потребностях подразделения, получает от работников запросы на изменение плана и корректирует план подразделения. При децентрализованном управлении агент сохраняет эти функции, но дополнительно координирует работу с другими структурными подразделениями: корректирует план с учетом результатов обсуждения, сообщает о потребностях другим подразделениям, по запросу информирует их о ходе выполнения заказа и запрашивает информацию о результатах работы других подразделений, что позволяет обеспечить более гибкую и согласованную работу системы в условиях изменяющейся среды (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020).

Агент Обслуживающее подразделение выполняет функции поддержки и обеспечения бесперебойного функционирования производственных процессов. Его убеждения включают задачи подразделения и наличие ресурсов для их выполнения. Основные желания направлены на максимизацию скорости выполнения задач подразделения. В рамках централизованного управления агент получает задание от предприятия, по запросу информирует предприятие о ходе выполнения задания, уведомляет предприятие о потребностях подразделения, получает запросы от работников на изменение плана и корректирует план подразделения (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020). При децентрализованном управлении агент дополнительно координирует свою работу с другими структурными подразделениями: корректирует план с учетом результатов обсуждения, сообщает о потребностях другим подразделениям, по запросу уведомляет их о ходе выполнения задания, принимает задания от других подразделений и запрашивает информацию о результатах их работы, что обеспечивает более гибкое и согласованное функционирование системы в условиях изменяющейся среды.

Агент Производственная площадка представляет собой локализованную единицу, на которой выполняются производственные операции и реализуются задачи, поставленные вышестоящими подразделениями. Его убеждения включают цели агента и поставленные задачи, а желания направлены на максимизацию скорости достижения этих целей и выполнения задач, поставленных следующему в иерархии работнику. В рамках централизованного управления агент получает задание, по запросу информирует вышестоящий уровень о ходе

выполнения, запрашивает изменения плана подразделения и индивидуального плана, а также выполняет рабочие задачи. При децентрализованном управлении агент дополнительно координирует свою работу с другими производственными площадками: сообщает им о ходе выполнения задания, обсуждает изменения плана подразделения, информирует о желании распределить задачи, принимает задания от других производственных площадок и участвует в совместном планировании, что обеспечивает гибкость и согласованность выполнения производственных операций в условиях изменяющейся среды.

На основе выделенных агентов можно сформировать типовую организационную модель системы технологических процессов, которая описывает взаимодействия между основными агентами системы (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020). Онтология служит основой для построения мультиагентной модели и обеспечивает формализованное представление знаний о системе (Kulvatunyou et al., 2022; May et al., 2022; Gorodetsky, 2015; Hadzic et al., 2009; Taha, 2005; Massart et al., 2003). Онтология представлена на рис. 1.



**Рисунок 1.** Онтологическая модель организационной системы технологических процессов

В модели Предприятие выступает центральным управляющим агентом. Предприятие передает Производственным подразделениям планы выполнения задач через управляющие воздействия (на рис.1. обозначены стрелками синего цвета). Осуществляется двусторонняя связь, Предприятие получает результаты от Производственных подразделений при осуществлении заданного плана. Предприятие также определяет ресурсы для выполнения планов, которые распределяются через соответствующее Обслуживающее подразделение, обеспечивающее Производственные подразделения необходимыми ресурсами – оборудованием, персоналом и прочими средствами – и рассчитывающее затраты на их предоставление.

Производственные подразделения, получив задания и планы от предприятия, передают Обслуживающему подразделению свои запросы на ресурсы. При этом перед передачей информации о ресурсах и задачах подразделения уточняют конкретные производственные планы с Производственными площадками, которые отвечают за выполнение конкретных операций. Производственные площадки могут обмениваться задачами и ресурсами между собой, однако такие взаимодействия осуществляются только при условии, что они приносят выгоду как для самих Производственных площадок, так и для соответствующего Производственного подразделения. Аналогично Производственные подразделения могут

координироваться между собой для обмена задачами и ресурсами, если это повышает эффективность выполнения планов.

Представленная онтология отражает не только иерархические управляющие связи (от предприятия к подразделениям и площадкам), но и двусторонние информационно-ресурсные потоки, обеспечивающие гибкость и адаптивность системы к изменениям внутренней и внешней среды.

Таким образом, выбор методов исследования обоснован их способностью формализовать рациональное поведение агентов в сложных системах, структурировать знания о системе с помощью онтологической модели и воспроизводимо моделировать сценарии работы технологических процессов с учетом мультиагентности, множественности целей и динамики системы (Burlutskaya, 2024a).

Определив типовую структуру системы технологических процессов, можно переходить к описанию метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах.

### 3. Результаты

#### 3.1. Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах

Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах, основанный на онтологической модели организационной системы технологических процессов, заключается в последовательном выполнении следующих задач:

1. построении онтологической модели системы технологических процессов объекта исследования;
2. описании структуры интеллектуальных агентов МАС технологических процессов.

В рамках построения онтологической модели системы технологических процессов объекта исследования определяется организационная структура МАС технологических процессов. Для решения поставленной задачи необходимо:

1. определение набора моделируемых участников системы и их ролей;
2. определение возможностей участников для коммуникации (информирования) и управления.

В рамках описания структуры интеллектуальных агентов МАС технологических процессов определяется архитектура интеллектуальных агентов МАС. Для решения поставленной задачи необходимо описание индивидуальных возможностей и желаний участников в терминах одной из когнитивных архитектур или моделей когнитивных агентов.

Рассмотрим применение метода на примере системы технологических процессов нефтегазовой отрасли.

#### 3.2 Моделирование мультиагентных взаимодействий для системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли

Описание системы (Sharko et al., 2025; Fedyaevskaya, et al., 2023; Bolsunovskaya et al., 2023):



Опишем индивидуальные возможности и желания участников в терминах модели когнитивных агентов BDI, где убеждения отражают знания агента о системе, желания определяют его целевые функции, а намерения задают стратегии действий на основе этих знаний и целей (Caillou P. et al., 2017).

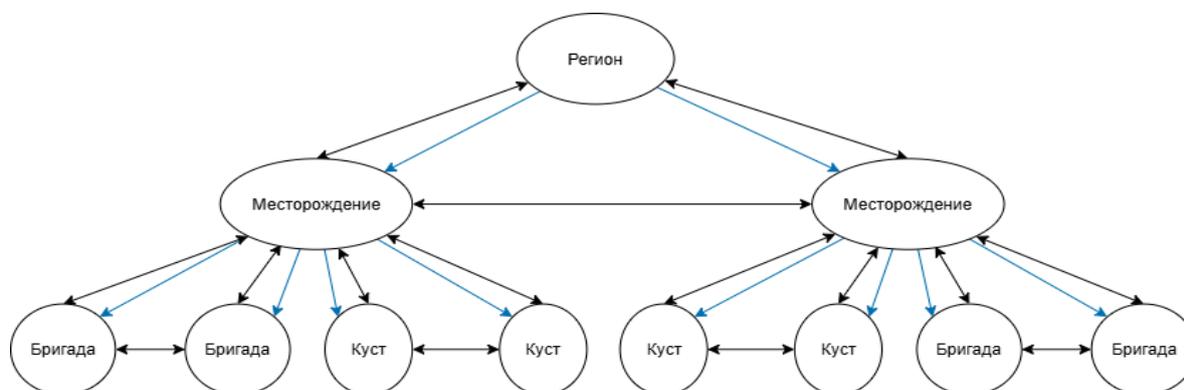
Так, агент Регион представляет собой верхний уровень управления и обладает убеждениями о доступных ресурсах, включая количество бригад каждого типа, количество месторождений, а также исторические данные по добыче и затратам. Его основное желание заключается в максимизации дебита, а намерения включают распределение бригад между месторождениями и вычисление ожидаемого дебита и затрат на добычу нефти.

Агент Месторождение учитывает доступные ресурсы, такие как количество бригад каждого типа, план добычи, расписание бурения и проведения ГТМ, количество и параметры кустов, прогнозируемый объем добычи при базовом сценарии и при обмене ресурсами, а также коэффициент альтруизма, определяющий соотношение целевых функций. Желания агента сосредоточены на максимизации общего дебита и выполнении или перевыполнении плана, а его намерения включают распределение бригад между кустами, взаимодействие с другими месторождениями для передачи или получения бригад, а также вычисление ожидаемого дебита и затрат.

Агент Куст ориентирован на выполнение расписания бурения и ГТМ, прогнозируемый объем добычи при базовом сценарии и при обмене ресурсами, параметры кустов и список скважин. Его желание также заключается в максимизации общего дебита, а намерения включают получение и передачу бригад другим кустам, а также расчет ожидаемого дебита и затрат на добычу.

На локальном уровне агент Бригада учитывает временные и финансовые затраты на перемещение и оборудование, координаты кустов, длительность операций, базовое расписание бурения и ГТМ, прогнозируемые объемы добычи и затраты при базовом сценарии, а также результаты прогнозирования при обмене операциями. Желания бригады направлены на максимизацию общего дебита при минимизации затрат на перемещение, а намерения включают получение и передачу операций другим бригадам и составление расписания выполнения операций.

Онтологическая модель описанной системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли представлена на рис. 3.



**Рисунок 3.** Онтологическая модель системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли

В разработанной модели предполагается, что интеллектуальные агенты реализуют попарное взаимодействие как с агентами своего уровня, так и с агентами верхнего и нижнего уровней в рамках иерархии управления. При описанной схеме взаимодействия реализуется итеративное уточнение сценариев разработки: от агентов верхнего уровня до агентов нижнего уровня (Burlutskaya, 2024b; Gintciak et al., 2025). Координация попарных взаимодействий агентов одного уровня осуществляется агентом верхнего уровня, что обеспечивает контроль выполнения глобальных целей системы.

Таким образом, Регион передает ресурсы Месторождениям в соответствии с первоначальным распределением, а также определяет планы по добыче. Для выполнения плана Месторождения запрашивают уточняющую информацию у Кустов, которые уточняют производственные планы с учетом фактической информации о состоянии инфраструктуры, темпах разработки запасов и других специфических особенностях. При необходимости Кусты запрашивают возможность коммуникации с другими агентами своего уровня для улучшения сценариев распределения. Аналогично строится взаимодействие Бригад.

#### 4. Обсуждение

Концепция МАС не является новой – эта тема разрабатывается учеными различных мировых школ с XX века. Тем не менее тема не теряет актуальности: мультиагентность систем является фактором, усиливающим сложность самих систем, повышающим трудоемкость и снижающим адекватность моделирования и прогнозирования в таких системах (Gorodetsky et al., 2017; Rzevski & Skobelev, 2015). Мультиагентность в контексте данной работы можно описать как существование в системе двух и более агентов (принимающих стратегические решения элементов системы), что характерно для подавляющего большинства сложных технических систем с социальным компонентом, в которых мультиагентность обеспечивается участием множества людей в процессах управления и принятия решений (Gintsyak et al., 2023). Конфликты или несогласованные действия агентов в процессах таких систем могут приводить к существенному снижению эффективности функционирования систем по производственным и экономическим критериям. Следовательно, анализ мультиагентных взаимодействий, а также построение адекватных моделей таких взаимодействий, равно как и предложение практико-применимых методов поддержки принятия решений и информационного обеспечения процессов управления в МАС, требуют отдельного тщательного исследования, поскольку его результаты могут обеспечить прямое положительное влияние на экономическую деятельность (Chernyshev et al., 2023).

Результаты данного исследования расширяют практики в области разработки моделей сложных организационных систем междисциплинарной природы в части описания подхода к моделированию мультиагентных взаимодействий. На следующих этапах исследования планируются разработка и программная реализация алгоритмов оптимизации технологических процессов на базе мультиагентного подхода, основанных на гибридном моделировании систем технологических процессов как совокупности процессов, моделируемых с использованием имитационного моделирования, и организационной системы интеллектуальных агентов, осуществляющих управление процессами, с использованием мультиагентного подхода (Gintciak et al., 2025).

## 5. Заключение

В рамках данной работы приводится описание метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на основе онтологической модели организационной системы технологических процессов. В ходе работы приводится описание типовых агентов системы технологических процессов, их задач и целевых функций. Результатом работы являются онтологическая модель организационной системы технологических процессов, а также метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на ее основе. В рамках апробации предложенного метода приводится описание мультиагентных взаимодействий для системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли.

## Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (соглашение № 075-15-2025-210 от 04 апреля 2025).

## Список литературы

- Ayhan, M.B., Aydin, M.E., Öztemel, E., 2015. A multi-agent based approach for change management in manufacturing enterprises. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 975–988. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0794-2>
- Boccella, A.R., Centobelli, P., Cerchione, R., Murino, T., Riedel, R., 2020. Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences* 10 (3), 755. <https://doi.org/10.3390/app10030755>
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. Multi-agent oriented programming: programming multi-agent systems using JaCaMo. Mit Press, Saint-Etienne.
- Caillou, P., Gaudou, B., Grignard, A., Truong, C.Q., Taillandier, P., 2017. A Simple-to-Use BDI Architecture for Agent-Based Modeling and Simulation, in: Jager, W., Verbrugge, R., Flache, A., de Roo, G., Hoogduin, L., Hemelrijk, C. (eds.). *Advances in Social Simulation 2015*. Springer, Cham, pp. 15–28. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9_2)
- Calegari, R., Ciatto, G., Denti, E., Omicini, A., 2021. Logic-based technologies for multi-agent systems: a systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 35 (1), 1, <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09478-3>
- Cerda-Flores, S.C., Rojas-Punzo, A.A., Nápoles-Rivera, F., 2022. Applications of Multi-Objective Optimization to Industrial Processes: A Literature Review. *Processes* 10 (1), 133. <https://doi.org/10.3390/pr10010133>
- Chernyshev, S.A., 2023. Problemy multiagentnykh sistem i vozmozhnye puti ikh resheniya [Problems of multi-agent systems and possible solutions]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie [Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis and Management]* (3), 103–113. (In Russian).
- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104958. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Fedyavskaya, D.E., Burlutskaya, Z.V., Gintciak, A.M., Dixit, S., 2023. Hierarchical Cybernetic Model of Oil Production Enterprise with Distributed Decision-Making Centers, in: Bencsik, A., Kulachinskaya, A. (eds.). *Digital Transformation: What is the Company of Today?*. Springer, Cham, pp. 21–34. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9_2)
- Foit, K., 2022. Agent-based Modelling of Manufacturing Systems in the Context of “Industry 4.0”. *Journal of Physics: Conference Series* 2198 (1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012064>
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: Mařík, V., Kadera, P., Rzevski, G., Zoitl, A., Anderst-Kotsis, G., A Min Tjoa, Khalil, I. (eds.) *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Cham, pp. 52–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6_5)
- Gorodetsky, V., Samoylov, V., Trotsky, D., 2015. The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 54 (5), 765–782. <https://doi.org/10.1134/S1064230715030089>
- Hadzic, M., Wongthongtham, P., Dillon, Th., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Huber M.J., 1999. JAM: A BDI-theoretic mobile agent architecture, in: *AGENTS '99: Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents*, pp. 236–243. <https://doi.org/10.1145/301136.301202>
- Kulvatunyou, B., Drobnjakovic, M., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Leng, J., Sha, W., Lin, Z., Jing, J., Liu, Q., Chen, X., 2023. Blockchain smart contract pyramid-driven multi-agent autonomous process control for resilient individualised manufacturing towards Industry 5.0. *International Journal of Production Research* 61 (13), 4302–4321. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2089929>
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L., 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Kiefer, L., Kuhnle, A., Lanza, G., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Rozs, R., Ando, M., 2020. Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems in the 21st Century Industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 64 (1), 51–66. <https://doi.org/10.3311/PPme.14413>

- Sharko, P.A., Burlutskaya, Z.V., Zubkova, D.A., Gintciak, A.M., Pospelov, K.N., 2025. AI-Supported Decision Making in Multi-Agent Production Systems Using the Example of the Oil and Gas Industry. *Applied Sciences* 15 (10), 5366. <https://doi.org/10.3390/app15105366>
- Taha, H.A., 2005. *Operations Research: An Introduction*, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Termine, A., Antonucci, A., Primiero, G., Facchini, A., 2023. Imprecise Probabilistic Model Checking for Stochastic Multi-agent Systems. *SN Computer Science* 4 (5), 443. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-01817-x>
- Wang, J., Hong, Y., Wang, J., Xu, J., Tang, Y., Han, Q. L., Kurths, J., 2022. Cooperative and competitive multi-agent systems: From optimization to games. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 9 (5), 763–783. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105506>
- Winikoff, M., Sidorenko G., 2023. Evaluating a Mechanism for Explaining BDI Agent Behaviour, in: *Explainable and Transparent AI and Multi-Agent Systems (EXTRAAMAS 2023)*. Springer, Cham, pp. 18–37. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40878-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40878-6_2)
- Wooldridge, M.J., 2009. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Publ., Chichester.
- Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Петряева А.А., Зубкова Д.А., Успенский М.Б., Селедцова И.А. Возможности применения гибридного подхода в моделировании социально-экономических и социотехнических систем // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2022. № 3. С. 73–86. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86>.
- Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Федяевская Д.Э., Петряева А.А., Бурлуцкая Ж.В. Комплексное моделирование процессов нефтедобычи: аналитический обзор. *Автоматизация и информатизация ТЭК* // 2023. № 2 (595). С. 51–62. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2\(595\)-51-62](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62)
- Бурланков С.П., Бурланков П.С., Скворцов А.О. Основные понятия и классификация социотехнических, технико-экономических и социально-экономических систем // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки*. 2017. № 2 (42). С. 169–183. <https://doi.org/10.21685/2072-3016-2017-2-17>
- Бурлуцкая Ж.В. Возможности применения мультиагентного подхода для задач составления производственного расписания // *Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXVIII Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1*. СПб.: Политех-Пресс, 2024. С. 507–513. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-489>
- Бурлуцкая Ж.В. Перспективы применения мультиагентного подхода для моделирования организационных систем. *Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник научных трудов Всероссийской студенческой учебно-научной конференции*. СПб.: Политех-Пресс, 2024. С. 95–99.
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Пospelov К.Н., Ватаманюк И.А. Применение мультиагентного подхода для формирования расписания в распределенных производственных системах // *Современные подходы в системном инжиниринге и цифровом моделировании сложных производственных систем: сборник трудов I Всероссийской научно-практической конференции*. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. С. 18–22. DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-181.
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Федяевская Д.Э., Пospelov К.Н., Ракова В.В. Цифровое моделирование социотехнических и социально-экономических систем: монография. СПб.: Политех-Пресс, 2023. 164 с.
- Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2012. Т. 51. № 2. С. 256–281.
- Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем // *Управление большими системами*. 2017. № 66. С. 94–157.
- Пospelov К.Н. Метод оценки ограниченной рациональности агентов в задачах управления инновационными проектами // *Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник трудов IV всероссийской студенческой учебно-научной конференции*. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 156–161. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-300>
- Пospelov К.Н., Гинцяк А.М. Кибернетическая формализация задач управления с учетом ограниченной рациональности в организационных системах // *Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 6.0 (ИНПРОМ-2025): сборник трудов международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2*. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 492–495. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/134>
- Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? *Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями / пер. с англ.* Самара: Офорт, 2015. 290 с.
- Цуканов М. А., Боева Л. М., 2012. Мультиагентная система поддержки принятия решений по оперативному планированию и технологической координации сложноструктурированных производственных систем // *Управление большими системами*. 2012. № 39. С. 254–263.
- Чернышев С.А. Проблемы мультиагентных систем и возможные пути их решения // *Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы модели, анализ и управление*. 2023. № 3. С. 103–113. <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.23.03.P.231>
- Шарко, П. А., Бурлуцкая Ж.В. Подход к выбору организационной структуры агентов при моделировании сложных организационных систем // *Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 6.0 (ИНПРОМ-2025): сборник трудов международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2*. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 523–526. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/142>

## References

- Ayhan, M.B., Aydin, M.E., Öztemel, E., 2015. A multi-agent based approach for change management in manufacturing enterprises. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 975–988. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0794-2>
- Boccella, A.R., Centobelli, P., Cerchione, R., Murino, T., Riedel, R., 2020. Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences* 10 (3), 755. <https://doi.org/10.3390/app10030755>
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. Multi-agent oriented programming: programming multi-agent systems using JaCaMo. Mit Press, Saint-Etienne.
- Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., Burlutskaya, Z.V., Petryeva, A.A., Zubkova, D.A., Uspenskiy, M.B., Seledtsova, I.A., 2022. The Opportunities of Using a Hybrid Approach for Modeling Socio-Economic and Sociotechnical Systems. *Proceedings of VSU, Series: Systems Analysis and Information Technologies* 3, 73–86. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86>
- Bolsunovskaya M.V., Gintciak A.M., Fedyaevskaya D.E., Petryaeva A.A., Burlutskaya Zh.V., 2023. Complex modeling of the oil production processes: analytical review. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex* 2 (595), 51–62. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2\(595\)-51-62](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62)
- Burlankov S.P., Burlankov P.S., Skvortsov A.O., 2017. Basic Concepts and Classification of Socio-Technical, Techno-Economic and Socio-Economic Systems. *University proceedings. Volga region. Social sciences* 2 (42), 169–183. <https://doi.org/10.21685/2072-3016-2017-2-17>

- Burlutskaya Zh.V., 2024a. The Prospects for the Application of a Multi-Agent Approach to Modeling Organizational Systems, in: *Innovation Management in the Context of Digital Transformation: Proceedings of the 3d All-Russian Student Educational and Scientific Conference*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 95–99.
- Burlutskaya Zh.V., 2024b. The Possibilities of Using a Multi-Agent Approach for Production Scheduling Tasks, in: *Sistemnyy analiz v proyektirovanii i upravlenii [Systems analysis in design and management]* 1. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 507–513. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-489>
- Caillou, P., Gaudou, B., Grignard, A., Truong, C.Q., Taillandier, P., 2017. A Simple-to-Use BDI Architecture for Agent-Based Modeling and Simulation, in: Jager, W., Verbrugge, R., Flache, A., de Roo, G., Hoogduin, L., Hemelrijk, C. (eds.). *Advances in Social Simulation 2015*. Springer, Cham, pp. 15–28. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9_2)
- Calegari, R., Ciatto, G., Denti, E., Omicini, A., 2021. Logic-based technologies for multi-agent systems: a systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 35 (1), 1, <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09478-3>
- Cerda-Flores, S.C., Rojas-Punzo, A.A., Nápoles-Rivera, F., 2022. Applications of Multi-Objective Optimization to Industrial Processes: A Literature Review. *Processes* 10 (1), 133. <https://doi.org/10.3390/pr10010133>
- Chernyshev, S.A., 2023. Problems of Multi-Agent Systems and Possible Ways to Solve Them. *Vestnik of the Russian New University. Series: Complex systems: models, analysis, management* 3, 103–113. <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.23.03.P.231>
- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104955. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Fedyavskaya, D.E., Burlutskaya, Z.V., Gintciak, A.M., Dixit, S., 2023. Hierarchical Cybernetic Model of Oil Production Enterprise with Distributed Decision-Making Centers, in: Bencsik, A., Kulachinskaya, A. (eds.). *Digital Transformation: What is the Company of Today?*. Springer, Cham, pp. 21–34. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9_2)
- Foit, K., 2022. Agent-based Modelling of Manufacturing Systems in the Context of “Industry 4.0”. *Journal of Physics: Conference Series* 2198 (1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012064>
- Gintsiyak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Fedyavskaya, D.E., Pospelov, K.N., Rakova, V.V., 2023. Digital Modeling of Sociotechnical and Socio-economic Systems. Politekh-Press, St. Petersburg.
- Gintciak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Pospelov, K.N., Vatamaniuk, I.V., 2025. The Use of a Multi-agent Approach to Create Schedules in Distributed Production, in: *Modern Approaches in Systems Engineering and Digital Modelling of Complex Production Systems: Proceedings I of the National scientific and practical conference*. Peter the Great Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, pp. 18–22. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-181>
- Gorodetskii, V.I., 2012. Self-organization and Multiagent Systems: I. Models of Multiagent Self-organization. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 51 (2), 256–281.
- Gorodetsky, V.I., Bukhvalov, O.L., Skobelev, P.O., 2017. Industrial Applications of Multi-agent Systems: Current State and Prospects. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami* 66, 94–157.
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: Mařík, V., Kadera, P., Rzevski, G., Zoitl, A., Anderst-Kotsis, G., A Min Tjoa, Khalil, I. (eds.) *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Cham, pp. 52–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6_5)
- Gorodetsky, V., Samoylov, V., Trotsky, D., 2015. The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 54 (5), 765–782. <https://doi.org/10.1134/S1064230715030089>
- Hadzic, M., Wongthongtham, P., Dillon, Th., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Huber M.J., 1999. JAM: A BDI-theoretic mobile agent architecture, in: *AGENTS '99: Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents*, pp. 236–243. <https://doi.org/10.1145/301136.301202>
- Kulvatunyou, B., Drobnyakovic, M., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Leng, J., Sha, W., Lin, Z., Jing, J., Liu, Q., Chen, X., 2023. Blockchain smart contract pyramid-driven multi-agent autonomous process control for resilient individualised manufacturing towards Industry 5.0. *International Journal of Production Research* 61 (13), 4302–4321. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2089929>
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L., 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Kiefer, L., Kuhnle, A., Lanza, G., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Pospelov, K.N., 2025. Method for Assessing Bounded Rationality of Agents in Innovation Project Management Problems, in: *Innovation Management IN THE Context OF Digital Transformation: Conference proceedings of the IV National student educational and scientific conference*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 156–161. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-300>
- Pospelov, K.N., Gintciak, A.M., 2025. Cybernetic Formalization of Management Tasks with Bounded Rationality in Organizational Systems, in: *Intelligent Engineering Economics and Industry 6.0 (IEEI\_6.0\_INPROM): Proceedings of the international scientific and practical conference: in 2 vols. Vol. 2*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 492–495. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/134>
- Rozs, R., Ando, M., 2020. Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems in the 21st Century Industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 64 (1), 51–66. <https://doi.org/10.3311/PPme.14413>
- Rzevski, G., Skobelev, P. 2015. *Managing Complexity*. Ofort, Samara.
- Sharko, P. A., Burlutskaya Z.V. 2025. Approach to Choosing the Organizational Structure of Agents in Modeling Complex Organizational Systems, in: *Intelligent Engineering Economics and Industry 6.0 (IEEI\_6.0\_INPROM): Proceedings of the international scientific and practical conference: in 2 vols. Vol. 2*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 523–526. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/142>
- Sharko, P.A., Burlutskaya, Z.V., Zubkova, D.A., Gintciak, A.M., Pospelov, K.N., 2025. AI-Supported Decision Making in Multi-Agent Production Systems Using the Example of the Oil and Gas Industry. *Applied Sciences* 15 (10), 5366. <https://doi.org/10.3390/app15105366>
- Taha, H.A., 2005. *Operations Research: An Introduction*, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Termine, A., Antonucci, A., Primiero, G., Facchini, A., 2023. Imprecise Probabilistic Model Checking for Stochastic Multi-agent Systems. *SN Computer Science* 4 (5), 443. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-01817-x>

- Tsoukanov M., Boeva L., 2012. Multiagent System of Decision Support for Operational Control and Technological Coordination of Distributed Manufacture with Complex Structure. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami* 39, 254–263.
- Wang, J., Hong, Y., Wang, J., Xu, J., Tang, Y., Han, Q. L., Kurths, J., 2022. Cooperative and competitive multi-agent systems: From optimization to games. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 9 (5), 763–783. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105506>
- Winikoff, M., Sidorenko G., 2023. Evaluating a Mechanism for Explaining BDI Agent Behaviour, in: *Explainable and Transparent AI and Multi-Agent Systems (EXTRAAMAS 2023)*. Springer, Cham, pp. 18–37. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40878-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40878-6_2)
- Wooldridge, M.J., 2009. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Publ., Chichester.

Статья поступила в редакцию 20.11.2025, одобрена после рецензирования 04.12.2025, принята к публикации 11.12.2025

The article was submitted 20.11.2025, approved after reviewing 04.12.2025, accepted for publication 11.12.2025.

#### Информация об авторах

1. Жанна Бурлуцкая, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, [zhanna.burlutskaya@spbpu.com](mailto:zhanna.burlutskaya@spbpu.com)
2. Полина Шарко, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, [polina.sharko@spbpu.com](mailto:polina.sharko@spbpu.com)
3. Карина Лундаева, Аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0002-4995-3059>, [karina.lundaeva@spbpu.com](mailto:karina.lundaeva@spbpu.com)
4. Сальбек Бекетов, Аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)

#### About authors:

1. Zhanna Burlutskaya, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, [zhanna.burlutskaya@spbpu.com](mailto:zhanna.burlutskaya@spbpu.com)
2. Polina Sharko, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, [polina.sharko@spbpu.com](mailto:polina.sharko@spbpu.com)
3. Karina Lundaeva, Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0002-4995-3059>, [karina.lundaeva@spbpu.com](mailto:karina.lundaeva@spbpu.com)
4. Salbek Beketov, Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, [salbek.beketov@spbpu.com](mailto:salbek.beketov@spbpu.com)