

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛОГИСТИКИ КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рудь С.И.<sup>1</sup>, Аксенов К.А.<sup>1</sup>, Антонова А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: bpsim.dss@gmail.com

В статье рассматривается разработка имитационной модели логистики конвертерного производства. Имитационная модель разработана для определения оптимального интервала времени прихода заявок на конвертер 1. Целью оптимизации является нахождение такого временного интервала, при котором время ожидания обслуживания плавки на машине непрерывного литья заготовок будет минимальным, и будет полностью исключен простой данного агрегата, влияющий на качество продукции. Модель логистики конвертерного производства разработана в модуле создания моделей процессов автоматизированной системы выпуска металлургической продукции. Модуль создания моделей процессов поддерживает имитационное, мультиагентное моделирование. Агенты в разработанной модели предназначены для описания алгоритмов движения плавки через агрегаты согласно технологическому маршруту. В результате проведения серии экспериментов с моделью был найден наилучший временной интервал отложенной подачи плавки на конвертер 1, который составил 8 минут.

Ключевые слова: имитационное моделирование; агентное моделирование; конвертерное производство; логистические процессы; автоматизированная информационная система.

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF BOF PRODUCTION LOGISTICS

Rud S.I.<sup>1</sup>, Aksyonov K.A.<sup>1</sup>, Antonova A.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University n.a. the first president of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, street Mira, 19), e-mail: bpsim.dss@gmail.com

The article presents the development of a simulation model of BOF production logistics. The simulation model has been developed for the optimization experiment to determine the optimal time interval of delivering the melts to the converter 1. The goal of optimization is to find such a time interval in which the waiting time of the service on a continuous casting machine will be minimal, and downtime of the continuous casting machine will be minimal because it influences on the steel quality. The BOF production logistics model has been developed in a processes models creation module of the metallurgical enterprise information system. The processes models creation module supports the simulation model creation and agent-based simulation. Agents of the model developed are intended to describe the algorithms of the melts movement through aggregates according to the technological route. As a result of a series of experiments with the model the best time interval between deliveries of the melts on the converter 1 has been found and equal to 8 minutes.

Keywords: simulation; agent-based modeling; BOF production; logistics processes; automated information system.

Оптимизация, реинжиниринг, совершенствование технологий – каждое из этих направлений повышения эффективности производства актуально для любого предприятия. Если для среднего предприятия задача описания и анализа бизнес-процессов не вызывает трудностей, то для крупных предприятий металлургического производства данная задача представляется весьма трудоемкой, поскольку любое вмешательство без фундаментального понимания протекающих процессов может оказаться крайне болезненным. С другой стороны, всё происходящее на подобном предприятии детально изучено и, что особенно важно, задокументировано, что открывает широкие возможности для использования имитационного моделирования, хорошо зарекомендовавшего себя в исследовании логистических и организационных бизнес-процессов [2; 5].

В рамках исследования логистических процессов конвертерного производства (КП) была разработана имитационная модель работы транспортной системы конвертерного цеха (далее модель движения плавки) и решена проблема оптимизации подачи плавков на конвертеры с целью увеличения количества плавков, разливаемых на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Актуальность работы обусловлена требованием по увеличению количественных показателей выплавки стали на предприятиях металлургического профиля.

Разработка модели движения плавки была проведена с помощью автоматизированной информационной системы моделирования процессов предприятия (АИС МОД) автоматизированной системы выпуска металлургической продукции (АС ВМП) [1; 3; 4; 6; 8].

### Постановка задачи моделирования

Необходимо разработать модель перемещения стальной плавки с металлом в цехах КП. Данные о процессах собраны с помощью датчиков АСУ ТП, расположенных в цехах КП. Данные содержат информацию о передвижении единиц продукции в рамках КП по цехам выплавки стали (ЦВС), подготовки стальной плавки (ЦПК), внепечной обработки стали (ЦВОКС) и разливки стали (ЦРКС). КП включает в себя следующие агрегаты: три конвертера (К), три установки доводки металла (УДМ), три МНЛЗ. На рис. 1 приведена схема расположения агрегатов и транспортных средств КП. Маршрут прохождения плавки по агрегатам и времена обработки должны совпадать с реальным планом на производстве.

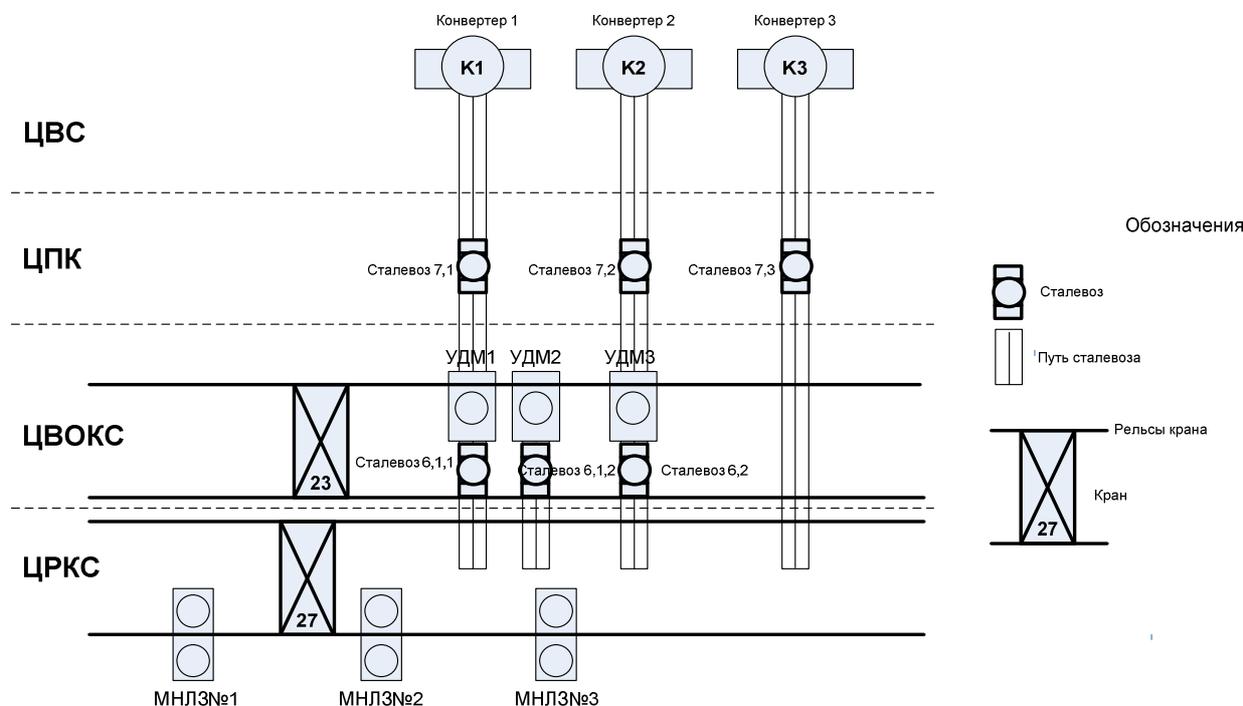


Рис. 1. Схема расположения агрегатов и транспортных средств КП

Рассмотрим прохождение одной плавкой стандартного технологического пути «Конвертер – УДМ – МНЛЗ». В таблице 1 представлена последовательность действий при прохождении плавкой данного маршрута с точки зрения транспортных агрегатов. Следует

отметить, что прохождение плавкой агрегатов «Конвертер» и «УДМ» автоматически закрепляет за плавкой соответствующие текущие пути движения сталевозов (рис. 1).

**Таблица 1**

Алгоритм работы транспортных средств КП

Наименование средства	Основной параметр	Последовательность действий
Сталевоз ЦВС / ЦПК	$v_c = 50 м / мин$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Начать работу на линии (по окончании слива стали с конвертера);</li> <li>2) двигаться под кран;</li> <li>3) остановиться под краном;</li> <li>4) ожидать снятие стальной ванны краном 23;</li> <li>5) вернуться к конвертеру;</li> <li>6) завершить работу.</li> </ol>
Сталевоз ЦВОКС	$v_c = 50 м / мин$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Начать работу на линии (с началом работы сталевоза 7.X в ЦВС);</li> <li>2) двигаться в ЦРКС;</li> <li>3) ожидать снятия стальной ванны со сталевоза 7.X;</li> <li>4) вернуться под кран 23 в ЦВОКС;</li> <li>5) ожидать погрузку стальной ванны с плавкой;</li> <li>6) двигаться под УДМ;</li> <li>7) ожидать конца обработки на УДМ;</li> <li>8) двигаться в ЦРКС;</li> <li>9) ожидать снятия стальной ванны краном 27;</li> <li>10) вернуться в ЦВОКС;</li> <li>11) завершить работу.</li> </ol>
Кран 23 ЦВОКС	$v_{кран} = 64 м / мин$ $v_{телега} = 22,7 м / мин$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Начать работу (с приходом сталевоза 7.X в ЦВОКС со стальной ванной);</li> <li>2) двигаться к подошедшему сталевозу;</li> <li>3) поднять краном стальную ванну;</li> <li>4) двигаться к свободному агрегату УДМ;</li> <li>6) ожидать прихода сталевоза 6.X из ЦРКС;</li> <li>7) установить краном стальную ванну на сталевоз 6.X;</li> <li>8) вернуться на место и завершить работу.</li> </ol>
Кран 27 ЦРКС	$v_{кран} = 64 м / мин$ $v_{телега} = 22,7 м / мин$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Начать работу (с приходом сталевоза 6.X в ЦРКС со стальной ванной);</li> <li>2) двигаться к подошедшему сталевозу;</li> <li>3) поднять краном стальную ванну;</li> <li>4) двигаться к нужному МНЛЗ;</li> <li>6) сдвинуть телегу крана с плавкой;</li> <li>7) поставить стальную ванну на поворотный стенд МНЛЗ;</li> <li>8) вернуться на место и завершить работу.</li> </ol>

Опишем целевую функцию задачи. Пусть  $T_i$  - среднее время простоя стальной ванны в ЦРКС в ожидании разлива на МНЛЗ в минутах,  $i$  - номер МНЛЗ. Целевая функция примет вид:

$$F = \sum_{i=1}^3 T_i \rightarrow \min \quad (1)$$

Необходимо также учитывать требование по недопущению остановки работы МНЛЗ вследствие отсутствия очередного стальной ванны с плавкой для разлива. Стальная ванна может

находиться на поворотном стенде МНЛЗ в ожидании обслуживания его агрегатом не более 15 минут, в противном случае сталь в ковше остынет и не разольется. Необходимо предложить варианты отложенной подачи плавков на конвертер 1, обеспечивающей оптимизацию целевой функции (1). Работу КП анализировать в течение 200 минут.

### Разработка имитационной модели логистики конвертерного производства

На рис. 2 приведен фрагмент модели движения плавки в конвертерном цехе в нотации мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) модуля создания моделей процессов (СМП) АИС МОД.

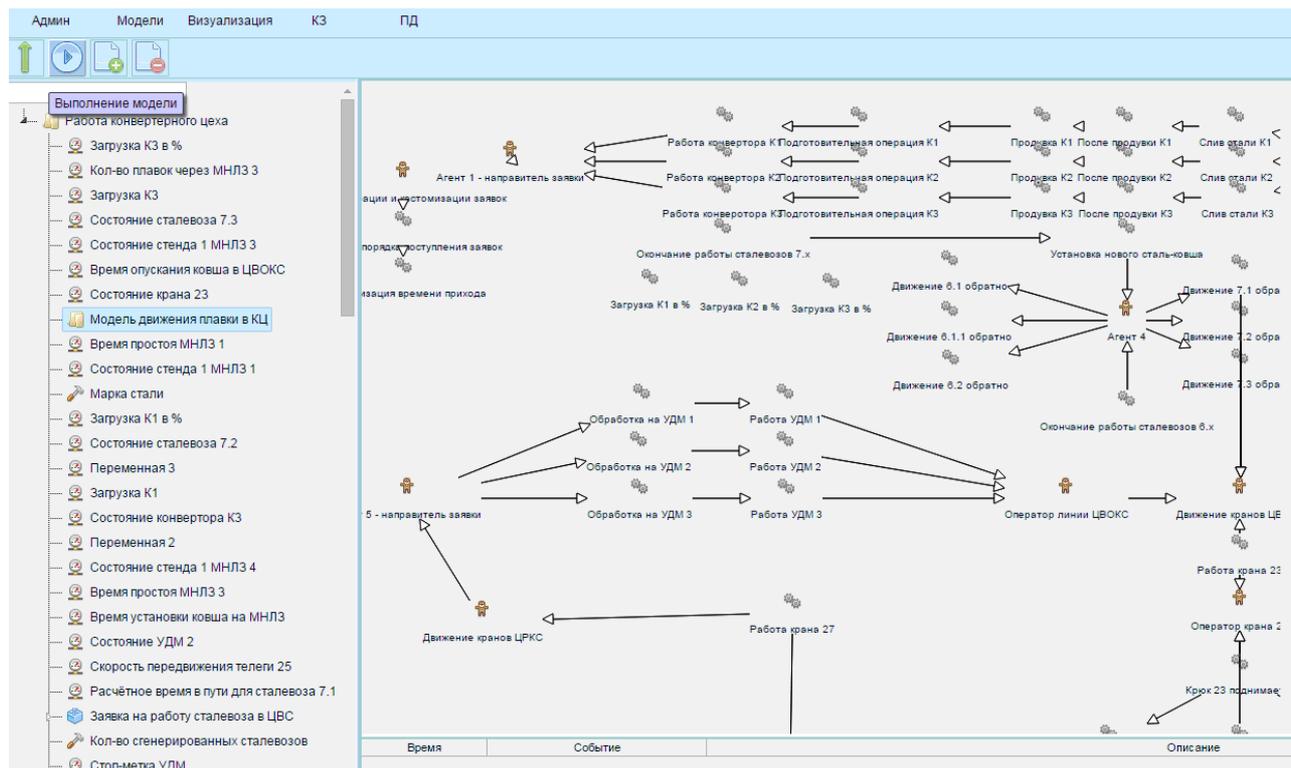


Рис. 2. Фрагмент модели движения плавки в модуле СМП АИС МОД

Нотация МППР [2; 8] предполагает, что узлы модели могут быть представлены в виде функциональных блоков или агентов, выступающих регуляторами процессов и имеющих наборы правил. В данном случае в используемых агентах с помощью трех видов заявок описаны все необходимые параметры плавки, механизмы регулирования движения транспортных средств и обработка конфликтных ситуаций.

Заявка z1 «Заявка на обработку металла» является основной заявкой, которая определяет маршрут следования плавки, время обработки плавки на агрегатах и этап, на котором находится сейчас плавка. Заявка z1 проходит через всю модель согласно технологическому маршруту плавки. Заявки z2 и z4 «Заявка на работу сталевоза» и «Заявка на работу крана» регулируют работу транспортных средств и применяются для описания логики работы кранов и сталевозов в модели.

Работу модели движения плавки условно можно разделить на работу семи блоков: 1) блок генерации заявок, включающий создание заявки и определение времени ее генерации; 2) блок описания работы конвертеров – операций подготовки, продувки, работы после продувки и слива стали; 3) блок описания работы сталевозов ЦВС и ЦВОКС – движение по линии, очередность работы и взаимодействие с кранами, создание и удаление заявки; 4) блок описания работы элементов УДМ – обработка исключений при возникновении новой плавки на линии сталевоза 6.1.1; 5) блок описания работы крана ЦВОКС – движение по линии, очередность работы и взаимодействие со сталевозами, создание и удаление заявки; 6) блок описания работы крана ЦРКС – движение по линии, очередность работы и взаимодействие со сталевозами, создание и удаление заявки; 7) блок описания работы элементов МНЛЗ – разворот поворотного станда и разливка плавки, подсчёт статистики.

Рассмотрим описание процесса движения сталевозов в ЦВС и ЦВОКС. Движение сталевоза 7.1 реализовано с помощью блока «Движение сталевоза 7.1», работающего в режиме интенсивности и прибавляющего на каждом такте пройденное расстояние:  $z2\_DistanceActuell:=z2\_DistanceActuell+pRes4$ . Условием выхода сталевоза 7.1 из движения является превышение пройденного им расстояния заданного значения:  $z2\_DistanceActuell \geq z2\_DistanceNeeded$ . Проверка данного условия реализуется в агенте-направителе заявок-сталевозов z2 и прикрепленных к ним заявок-плавков z1 (рис. 3).

Имя ситуации: Сталевоз 7.1 доехал от К1 до ЦВОКС (линия сво

Текстовое описание: Пришла заявка z1 z2

Диапазон с 0 по 0

IF

**Формула**

iRes56=0  
z2\_SteelCart=71  
z1\_SteelMARK=1  
Select(z2,a11)  
z2\_DistanceActuell>=z2\_DistanceNeeded  
iRes61=1  
Select(z1,a11)

**THEN**

№	Описание	Формула
1	Изменить метку прогресса	z1_Location:=11
2	Изменить метку прогресса	z2_Location:=2
3	Остановить движение	z2_ForwardMovement:=0
5	Скорректировать пройденное расстояние	z2_DistanceActuell:=84,4
6	Передать заявку на "Движение кранов ЦВОКС"	z1_owner:="a63"
7	Передать заявку на "Движение кранов ЦВОКС"	z2_owner:="a63"

Рис. 3. Описание ситуации агента-направителя заявок в модуле СМП АИС МОД

#### Анализ результатов моделирования

В модуле оптимизации процессов (ОПП) АИС МОД была проведена серия экспериментов по нахождению оптимального значения параметра «Отложенная подача плавков на конвертер 1» с точки зрения минимизации времени простоя МНЛЗ без разливки и времени простоя стальной в ожидании разливки на МНЛЗ. Результаты проведения серии экспериментов представлены в таблице 2.

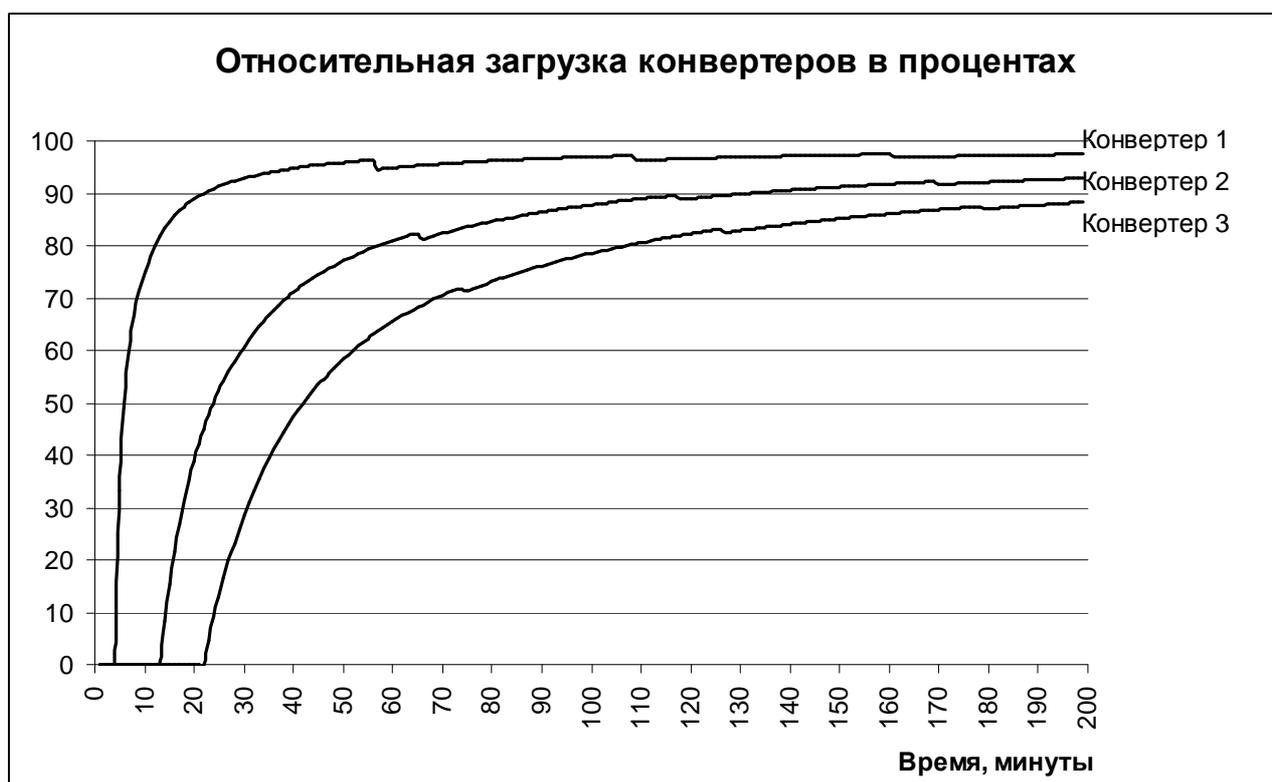
**Таблица 2**

Результаты проведения серии экспериментов в модуле ОПП АИС МОД

Номер эксперимента	Входные параметры	Выходные параметры				
	Отложенная подача плавков на конвертер 1, мин	Загрузка К1 %	Загрузка К2 %	Загрузка К3 %	Максимальное время простоя стальной, мин	Максимальное время простоя МНЛЗ, мин
1	5	97,41	94,38	91,40	6,5	1
2	8	92,91	88,38	83,67	0	1
3	11	97,47	91,40	85,32	6,5	1
4	14	97,47	90,00	82,32	6,5	1
5	17	97,47	88,38	79,79	6,5	1
6	20	83,80	78,25	67,71	5,5	1
7	23	79,74	67,68	55,58	1	1
8	26	97,42	83,83	0	0	2
9	29	88,36	76,77	0	0	2

Анализ таблицы 2 показал, что лучший результат достигается в эксперименте № 2, поскольку данный эксперимент обеспечивает минимизацию как времени простоя стальной перед разливкой на МНЛЗ, так и времени простоя МНЛЗ в ожидании очередного стальной. Оптимальное значение входного параметра анализируемых логистических процессов будет следующим: отложенная подача плавков на конвертер 1–8 минут.

Найденное значение отложенной подачи плавков также обеспечивает равномерную загрузку конвертеров (рис. 4). Графики, представленные на рис. 4, были построены с помощью сформированного в модуле ОПП отчета по результатам выполнения модели. Данный отчет содержит значения переменных модели (ресурсов, средств, операций и агентов) в зависимости от модельного времени.



*Рис. 4. Результаты проведения эксперимента № 2 с моделью движения плавки в модуле ОПП*

### **Заключение**

В ходе исследования логистических процессов конвертерного цеха в модуле СМП подсистемы моделирования АС ВМП была разработана имитационная модель, описывающая взаимодействие транспортных единиц и обрабатывающих агрегатов, правил их совместного функционирования, и реализующая различные технологические маршруты прохождения плавки через агрегаты конвертерного цеха. Различные алгоритмы движения плавки через агрегаты цеха согласно технологическому маршруту были описаны в модели с использованием баз знаний агентов, построенных на продукционных правилах.

Разработанная модель движения плавки была применена для нахождения оптимального значения параметра «Отложенная подача плавки на конвертер 1» с целью обеспечения непрерывности работы МНЛЗ и минимизации времени простоя стальной ванны с плавкой на поворотном стенде МНЛЗ. В результате проведения серии экспериментов в модуле ОПП подсистемы моделирования АС ВМП было найдено оптимальное значение управляемого параметра «Отложенная подача плавки на конвертер 1», равное 8 минутам. Полученные результаты согласуются с производственными показателями.

Результаты моделирования, полученные в ходе серии экспериментов, проведенных с имитационной моделью движения плавки в рамках конвертерного производства, подтверждают актуальность применения технологии мультиагентного имитационного

моделирования на крупных и средних промышленных предприятиях, в том числе металлургического профиля.

*Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0055 (проект 2012-218-03-167) при финансовой поддержке работ Министерством образования и науки Российской Федерации.*

### Список литературы

1. Аксенов К.А., Антонова А.С., Спицина И.А., Сысолетин Е.Г., Аксенова О.П. Разработка автоматизированной системы анализа, моделирования и принятия решений для металлургического предприятия на основе мультиагентного подхода // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7. – С. 49-53.
2. Аксенов К.А. Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2009. - № 6. - С. 38-45.
3. Бородин А.М., Мирвода С.Г., Поршневу С.В. Анализ современных средств прототипирования языков программирования // Программная инженерия. – 2014. – № 12. – С. 3-10.
4. Бородин А.М., Мирвода С.Г., Поршневу С.В. Особенности тестирования устойчивости к сбоям корпоративных информационных систем методом генерирования отказов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: [www.science-education.ru/119-14997](http://www.science-education.ru/119-14997) (дата обращения: 20.02.2015).
5. Имитационная модель электросталеплавильного цеха Челябинского металлургического комбината в AnyLogic. - URL: <http://www.anylogic.ru/case-studies/chelyabinsk-metallurgical-plant-uses-a-simulation-model-electric-furnace-melting-shop> (дата обращения: 30.03.2015).
6. Aksyonov K.A., Bykov E.A., Aksyonova O.P., Antonova A.S. Development of real-time simulation models: integration with enterprise information systems // Proceedings of ICCGI 2014: The Ninth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology, 22-26 June 2014, Sevilla. - P. 45-50.
7. Aksyonov K.A., Bykov E.A., Smoliy E.F., Aksyonova O.P., Nevolina A.L. Application of decision support system BPsim.DSS to Logistical Processes of Fuel Transportation Company // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, MIM 2013; Saint Petersburg; Russian Federation; 19-21 June 2013. - P. 648-652.
8. Aksyonov K.A., Spitsina I.A., Sysoletin E.G., Aksyonova O.P., Smoliy E.F. Multi-agent approach for the metallurgical enterprise information system development // 24th Int. Crimean

Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014), 7—13 September 2014, Sevastopol, vol. 1. - P.437-438.

**Рецензенты:**

Доросинский Л.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;

Поршнеv С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники информационных систем, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.