

DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62
УДК 681.51:004.03

А. В. Затонский, В. Н. Уфимцева

РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТНЫХ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО И МНОГОАГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

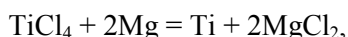
Сформулирована проблема совместного управления участками восстановления и электролиза на производстве титановой губки. Проведен анализ рабочего процесса участков электролиза и восстановления губчатого титана, позволяющий установить системные связи и исследовать методы совместного управления ими. Определены параметры всех внутренних процессов. Отмечены недостатки традиционных систем имитационного моделирования применительно к данной задаче. Разработан набор классов C++, позволяющих создавать имитационные (и – потенциально – многоагентные и активные) системы промышленных процессов, который отличается отсутствием структурно предопределенных связей между объектами и сложными алгоритмами действия и взаимодействия объектов. Связи между объектами возникают по мере исполнения модели и поэтому могут гибко меняться. Технически классы всех объектов модели являются наследными от одного базового класса, что позволяет удобно организовать их опрос из функции продвижения времени. Продвижение времени организовано методом Δt , т. е. особые состояния учитываются по окончании определенного отрезка времени. Единая функция продвижения времени циклически перебирает все объекты до тех пор, пока их состояние не перестанет изменяться. Глубина опроса задается априорно. Произведена проверка созданного средства моделирования на задаче с известным решением. На основе набора классов создана модель элементарной ячейки системы массового обслуживания. Произведено сравнение с результатами моделирования аналогичной ячейки в GPSS. Показано соответствие результатов моделирования. Исследован вопрос необходимой глубины опроса объектов при продвижении времени.

Ключевые слова: титановая губка, производство, управление, имитационное моделирование.

Введение

Титан и его сплавы являются важными конструкционными материалами. Титановые сплавы имеют высокую удельную прочность, высокую жаропрочность и коррозионную стойкость. Они широко применяются в космической технике, авиа- и автомобилестроении, строительстве, медицине и других отраслях промышленности [1, 2]. Россия является крупным производителем титана, который производится ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», – единственной в мире титановой компанией, осуществляющей полный цикл производства от переработки сырья до выпуска конечной продукции. В составе корпорации две промышленные площадки: «ВСМПО» в городе Верхняя Салда Свердловской области и «АВИСМА», филиал в городе Березники Пермского края, которые связаны между собой единой технологической цепочкой. От поставок титана из России зависят крупные машиностроительные компании. Так, Boeing получает от ВСМПО около 35 % титана, необходимого для производства гражданских самолетов, а самолет AirbusA380 на 60 % сделан из уральского титана [3]. Следовательно, повышение эффективности и решение проблем титанового производства в России является важной задачей общегосударственного уровня.

Производство губчатого титана осуществляется химической реакцией



определяющей круговорот магния в производстве. Металлический магний в расплаве вакуумными ковшами подается из основного производственного участка № 3 (ОПУ-3) на восстановление тетрахлорида титана на ОПУ-2. В ходе восстановления образуется хлорид магния, который порционно возвращается на электролиз в ОПУ-3. При этом из-за ошибок в планировании процессов возникает необходимость слива хлорида магния в короба с последующей длительной и дорогостоящей переработкой в ОПУ-1, что приводит к удорожанию производства (рис. 1).

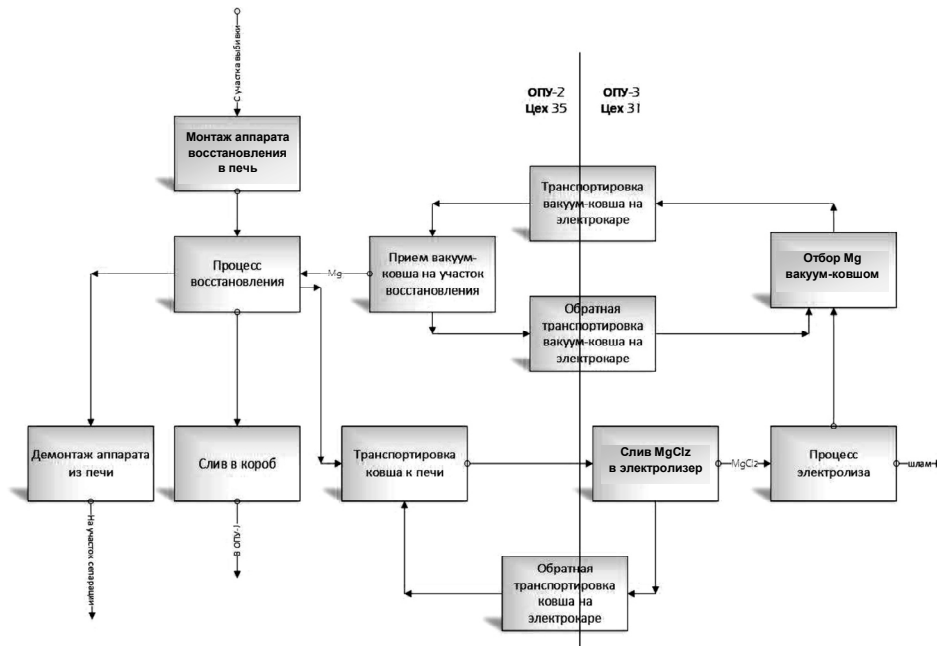


Рис. 1. Схема процессов, протекающих между ОПУ-2 и ОПУ-3

Описание объекта моделирования

Процессы восстановления и электролиза в производстве титана можно отнести к классу сложных объектов управления [4, 5]. Одним из возможных инструментов исследования таких производственных систем является имитационное моделирование систем массового обслуживания (СМО, *queuing system*) [6]. Многочисленные зарубежные [7, 8] и российские [9, 10] источники показывают эффективность применения имитационного моделирования при изучении и оптимизации деятельности предприятий и их подразделений. В частности, показано, что мультиагентное моделирование, являющееся развитием моделей массового обслуживания, служит эффективным средством поддержки принятия решений по управлению производством [11]. Напомним, что мультиагентная система (МАС) – это, в сущности, имитационная модель, в которой объектам («агентам») свойственна некоторая автономность, децентрализованность и ограниченность представлений [12]. Предельная автономность и ограниченность свойственны каналам и транзактам СМО. Программные агенты МАС описываются алгоритмами собственных действий и взаимодействия с другими программными агентами.

Совместная имитационная модель деятельности двух участков позволила бы установить причины, приводящие к отсутствию в нужный момент ковшей в ОПУ-2, вплоть до полного исключения ОПУ-1 из технологической схемы. Для построения такой модели в 2016–17 гг. были выполнены измерения продолжительности основных процессов, представленных на рис. 1. Кроме этого, для объектов технологической схемы (ковш, вакуум-ковш, печь восстановления, электролизер) определены их особые состояния, условия перехода из одного состояния в другое и т. д. В укрупненном виде они представлены на рис. 2.

В задаче совместного моделирования двух производственных участков, описанной выше, имеется кольцевое движение между участками транспортных средств, перевозящих порции химических веществ. В этой ситуации не слишком понятно, что выбрать в качестве «классического» канала, а также каким образом совместить модель СМО и модель технологического процесса, в ходе которого вырабатываются требуемые вещества, тем более, что выборка веществ из десятков реакторов осуществляется по довольно сложному алгоритму. Таким образом, в данной системе не возникает постоянной связи между реакторами и средствами транспортировки. В то же время набор реакторов нельзя рассматривать как обычную многоканальную СМО, т. к. производительность реакторов несколько отличается, и необходимо будет моделировать каждый отдельно.

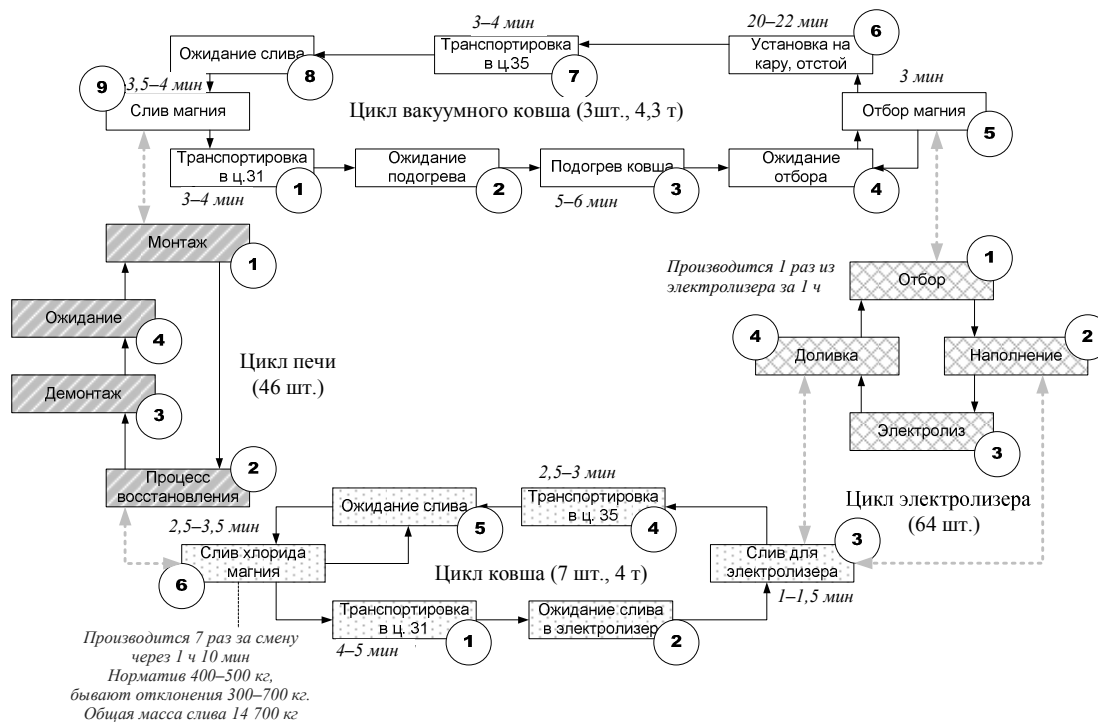


Рис. 2. Имитационная модель взаимодействия участков электролиза и восстановления губчатого титана

Подобная модель может быть создана средствами среды AnyLogic. Однако она предназначена главным образом для моделирования систем с одинаковыми транзактами, неразличимыми по сути задачи – например, пассажиропотока в аэропорту. Кроме того, общедоступная бесплатная версия среды ограничена по времени моделирования и количеству транзактов и устройств в модели. А по условию задачи требуется очень продолжительное моделирование совместной работы участков (недели и месяцы непрерывно). Поэтому в данном конкретном случае целесообразна разработка специального средства имитационного моделирования на одном из общецелевых языков программирования. Это, собственно, является целью данной работы. Выбор языка несущественен, для этой реализации был выбран C++ (*freeware* реализация TDM GCC). Программная часть модели делится на универсальную основу и конкретную реализацию устройств конкретной модели. Универсальная основа упрощена по сравнению с «полноценными» средствами имитационного моделирования в том смысле, что в ней не предусмотрено непосредственное программирование связей между устройствами (стабильных потоков транзактов). Вместо этого метод, реализующий продвижение времени для класса конкретного объекта, содержит алгоритм проверки изменения состояния произвольного количества других объектов, с которыми ситуативно связан данный. Такой подход усложняет реализацию конкретных классов: выражаясь упрощенно, вместо оператора входа в 1-й канал SEIZE 1 (в GPSS) необходимо для устройства № 1 описать на общецелевом языке программирования все связи, существующие в данный момент. Зато существенно упрощается глобальный метод продвижения времени, как это описано ниже.

Разработка средства моделирования

Разработанное средство имитационного моделирования выполнено в виде иерархии классов и их дружественных функций. Вспомогательным классом является *event* – класс состояния устройства, содержащий строчный список описания состояний и их номера. Базовым классом для всех устройств является абстрактный класс *obj*. Он содержит общие для всех возможных устройств переменные в защищенной (*protected*) области, такие как строковое имя объекта, целочисленный номер текущего состояния объекта *now_event*, модельное время, в которое

наступит смена состояния *next_time*, справочный номер следующего состояния объекта (если он используется) *next_event*, количество возможных состояний объекта *len_event* и др. Большинство данных класса обрабатываются конструкторами производных классов и функцией продвижения времени. Класс также содержит указатель на двухпараметрическую функцию генератора случайных чисел (ГСЧ) и его параметры для конкретного объекта. Генератор случайных чисел с равномерным статистическим распределением моделируется библиотечной функцией C++ *rand ()*, остальные ГСЧ (нормальное, экспоненциальное распределения, распределение Пуассона и др.) реализованы методом обратной функции. Конструктор базового класса присваивает каждому объекту уникальный номер и инициализирует некоторые данные. Конструктор каждого производного класса должен:

- 1) завершить изменение всех необходимых этому объекту внутренних переменных базового и производного классов (например, объект «очередь» LIFO или FIFO будет, очевидно, содержать список объектов в этой очереди, который надо инициализировать);
- 2) добавить в список необходимое количество своих возможных состояний (их количество передается конструктору *obj::obj ()* перед выполнением конструктора производного класса);
- 3) указать, какой ГСЧ использовать, и его параметры;
- 4) возможно, установить время первого события с этим экземпляром класса (иначе *obj::obj ()* установит *next_time* в 0, и первый же вызов функции обработки продвижения времени констатирует особое состояние);
- 5) добавить этот экземпляр объекта производного класса в односвязный список *list* объектов типа *obj**, реализованный очевидным образом в виде класса. Порядок объектов в этом списке определяет порядок их перебора при продвижении времени.

Класс *obj* содержит также переменную *state_change*, позволяющую реализовывать обработку продвижения времени до тех пор, пока изменения состояний одних объектов будут вызывать изменения состояний других объектов.

Главная функция продвижения времени *main_run ()*, дружественная (*friend*) к классу *obj*, реализована следующим образом. Порядок перебора объектов в ней – в том порядке, в котором они были добавлены в список, а не по противотоку. Это, конечно, вызывает дополнительную погрешность моделирования. Так как в ядре этой системы моделирования вообще не предусмотрено понятие «связь между объектами», то противоток и невозможен в принципе. Поэтому цикл изменения и опроса состояний вызывается, пока хоть один объект в списке сообщает, что он изменился сейчас. Количество повторов цикла опроса всех объектов схемы ограничено переменной *max_cycle*. Изменился или нет, решает метод *run ()*, обязательно переопределенный в объекте (класс *obj* является абстрактным, функция *run ()* в нем чистая виртуальная и не имеет реализации).

Если *run ()* обнаруживает, что между прошлым и наступившим моментом времени произошло изменение состояния (т. е. *obj::next_time < now_time*), он устанавливает *obj::state_changed = 1*, изменяет *obj::now_event* и делает все, что ему необходимо с внутренними переменными, в том числе обязательно устанавливает новое значение *obj::next_time* так, чтобы оно было больше *now_time* (даже если его ГСЧ выдает меньше): нельзя несколько раз за шаг менять состояние.

Иначе, если *run ()* обнаруживает, что *obj::state_changed*, он просто сбрасывает его в 0.

Затем, если *state_changed == 0*, *run ()* проходит по всему списку объектов **list* и проверяет, есть ли объекты, у которых их *state_changed == 1*. Метод *run ()* должен отреагировать на изменение состояния тех объектов, которые ему известны как связанные с данным объектом. Если изменение состояния какого-то объекта вызывает изменение состояния другого объекта, то и в нем производятся необходимые изменения (точно меняется *obj::now_event*, возможно, меняются *obj::next_time* и *obj::next_event*; возможно, меняются внутренние параметры (типа длины очереди), а после этого *obj::state_changed* устанавливается в 1.

Методу *run ()* достаточно вернуть *state_changed*, чтобы сообщить, нужен ли еще один проход по списку объектов в главной функции. Однако чтобы все это не было слишком долго, количество проходов в главной функции ограничено целочисленной переменной *max_cycle*.

Для проверки реализуем на созданном средстве моделирования элементарную ячейку СМО с неограниченной очередью и производительностью канала 11 ± 2 единицы модельного времени на транзакт, которая нагружена потоком транзактов, поступающих каждые 12 ± 5 единицы модельного времени (ЕМВ).

Результатом моделирования в течение 1 млн ЕМВ является обработка в канале 83 356 транзактов, загрузка канала 0,916 (что близко к очевидному теоретическому значению $11/12 = 0,916 \overline{66}$...), максимальное количество транзактов в очереди – 5, среднее время пребывания в очереди 3,268 ЕМВ.

Для моделирования в С++ понадобились классы, производные от класса *obj*: генератор, транзакт, очередь, канал. Терминатор, собственно, не нужен, т. к. время моделирования будет задано непосредственно в *main ()*, а функцию удаления из памяти транзактов назначим каналу в момент окончания обработки транзакта.

Схема реализована, получен результат прогона продолжительностью 1 млн ЕМВ.

В результате моделирования получена максимальная длина очереди 5, загрузка канала 0,916 018. Количество транзактов от GPSS отличается на 0,9 %. Максимальная длина очереди та же самая. Загрузка канала отличается от теоретической на 0,7 % (под загрузкой подразумевается отношение времени, в течение которого канал обрабатывает транзакты, к общему времени моделирования).

Возникает вопрос – какое максимальное количество циклов опроса за шаг необходимо установить? Ведь увеличение глубины опроса может существенно увеличить время моделирования. В этой элементарной системе все достаточно просто, т. к. в системе всего три устройства, и значение *max_cycle* > 3 избыточно. Однако проверим все же это экспериментально, изменяя глубину опроса и контролируя значения результатов моделирования (табл.).

Исследование влияния значения переменной *max_cycle* на результаты моделирования

| Max_cycle | Средняя глубина опроса | Максимальная глубина опроса | Длина очереди | Загрузка канала |
|-----------|------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|
| 10 000 | 0,215 | 2 | 5 | 0,916 |
| 1 000 | 0,215 | 2 | 5 | 0,916 |
| 100 | 0,215 | 2 | 5 | 0,915 |
| 10 | 0,215 | 2 | 5 | 0,915 |
| 2 | 0,215 | 2 | 5 | 0,915 |
| 1 | 0,234 | 1 | 57 | 0,914 |

Очевидно, что в глубине опроса более 2 нет необходимости. Однако как только необходимая глубина опроса перестает достигаться, модель выдает неадекватные результаты. В исходной задаче моделирования участков электролиза магния и восстановления губчатого титана количество устройств (донные ковши, вакуумные ковши, электрокары, электролизеры, печи восстановления, монтажный участок и т. д.) будет исчисляться сотнями, поэтому в ней необходимы будут дополнительные исследования зависимости погрешности моделирования от максимальной глубины опроса.

Заключение

В итоге поставленная в данной статье цель достигнута. Создано и опробовано средство, позволяющее моделировать системы массового обслуживания, в том числе те, которые сложно реализовать в стандартных имитационных средствах. Показано соответствие результатов моделирования в новой системе и в языке GPSS. Определены потенциальные проблемы моделирования сложных систем с помощью созданного ПО. Очевидно, что ПО может использоваться не только для классических СМО (*queuing system*), но и для активных, и для многоагентных систем, которые будут отличаться только реализацией метода *run ()* в соответствующих классах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство цветных металлов. URL: <http://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/proizvodstvo-tsvetnykh-metallov/542-proizvodstvo-titana.html> (дата обращения: 05.04.2018).
2. Seagle S. R. Titaniumprocessing. URL: <https://www.britannica.com/technology/titanium-processing#accordion-article-history> (дата обращения: 05.04.2018).
3. Полунин А. «Титановые санкции»: «Боинг» и «Аэробус» устроят России жесткую посадку. URL: <http://svpressa.ru/economy/article/179910/> (дата обращения: 05.04.2018).

4. *Кирич Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф., Краев С. Л.* Идентификация технологических процессов производства губчатого титана // Проблемы управления. 2008. № 4. С. 71–77.
5. *Кирич Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф., Бильфельд Н. В.* Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана // Титан. 2003. № 2 (13). С. 11–16.
6. *Rashid R., Hoseini S. F., Gholamian M. R., Feizabadi M.* Application of queuing theory in production-inventory optimization // Journal of Industrial Engineering International. 2015. Vol. 11. P. 485–494.
7. *Brown A. J.* A study of queuing theory in low to high rework environments with process availability. URL: https://uknowledge.uky.edu/ms_etds/2 (дата обращения: 05.04.2018).
8. *Bitran G. R., Dasu S. A.* Review of the Open Queueing Network Models of Manufacturing Systems. Working papers 3229-90, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Sloan School of Management, 1990. 64 p.
9. *Мультиагентные системы для управления производством в реальном времени.* URL: http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_04.pdf (дата обращения: 05.04.2018).
10. *Затонский А. В.* Моделирование технологического участка обогатительной фабрики в пакете MATLAB // Обогащение руд. 2014. № 4 (352). С. 49–54.
11. *Скобелев П. О.* Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 33–46.
12. *Иванова Е. В., Затонский А. В.* Оценка и моделирование научно-исследовательской работы студентов как многоагентной системы // Современные наукоемкие технологии. 2009. № 7. С. 75–78.
13. *Кирич Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф., Бильфельд Н. В.* Синтез и анализ оптимального позиционного управления технологическими процессами производства губчатого титана // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 9. С. 18–21.
14. *Тимочкина В. А., Уфимцева В. Н.* Технологические проблемы в процессе восстановления губчатого титана // Решение. 2017. Т. 1. С. 333–335.

Статья поступила в редакцию 21.05.2018

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Затонский Андрей Владимирович – Россия, 618404, Березники; Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета; г-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой автоматизации технологических процессов; zhenon@narod.ru.

Уфимцева Валентина Никитична – Россия, 618404, Березники; Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета; аспирант кафедры автоматизации технологических процессов; nuf_13@mail.ru.



A. V. Zatonskiy, V. N. Ufimtceva

DESIGN OF OBJECT ORIENTED SOFTWARE TO MULTI-AGENT MODELING OF ENTERPRISE PROCESSES

Abstract. The article focuses on the problem of jointly control of titanium sponge recovery and magnesium electrolysis stages. Analysis of operational process of segments of electrolysis and reduction of spongy titanium is made; it helps to determine systemic links and to investigate methods of joint control over them. The shortcomings of traditional simulation systems have been stated as applied to this task. A set of C++ classes is created to obtain possibility of designing simulation systems (and, potentially, multi-agent and active systems) of industrial processes that differ in absence of structurally pre-determined links between objects and complex algorithms of action and interaction of objects. Links between objects occur in the course of model developing, so the set can flexibly change. Technically, classes of all model objects are inherited from one base class, which allows to properly arrange their calling from a simulated time step function. Modelling time step is achieved by Δt method, i.e. when special states are accounted after termination of a certain time segment. A unified time step function is cyclically going over all objects, until their state stops changing. Depth of inquiry is set a-priori. A check of created modeling tool made by solving a task with the known solution has been made. A model of elementary queuing system cell based on the

class set has been developed. Comparison of the simulation results with results of a similar cell in GPSS. The correspondence of simulation results is shown. The problem of the necessary inquiry depth of objects using time step function has been investigated.

Key words: titanium sponge, production, control, simulation modeling.

REFERENSES

1. *Proizvodstvo tsvetnykh metallov* [Non-ferrous metal production]. Available at: <http://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/proizvodstvo-tsvetnykh-metallov/542-proizvodstvo-titana.html> (accessed: 05.04.2018).
2. Seagle S. R. *Titanium processing*. Available at: <https://www.britannica.com/technology/titanium-processing#accordion-article-history> (accessed: 05.04.2018).
3. Polunin A. "Titanovye sanktsii": "Boing" i "Aerobus" ustroiut Rossii zhestkuiu posadku ["Titanium sanctions": "Boing" and "Aerobus" will make hard landing for Russia]. Available at: <http://svpressa.ru/economy/article/179910/> (accessed: 05.04.2018).
4. Kirin Iu. P., Zatonskii A. V., Bekker V. F., Kraev S. L. Identifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Identification of technological processes of spongy titanium production]. *Problemy upravleniia*, 2008, no. 4, pp. 71-77.
5. Kirin Iu. P., Zatonskii A. V., Bekker V. F., Bil'fel'd N. V. Sovremennye napravleniia sovershenstvovaniia i razvitiia proizvodstva gubchatogo titana [Modern trends of improving and developing spongy titanium production]. *Titan*, 2003, no. 2 (13), pp.11-16.
6. Rashid R., Hoseini S. F., Gholamian M. R., Feizabadi M. Application of queuing theory in production-inventory optimization. *Journal of Industrial Engineering International*, 2015, vol. 11, pp. 485-494.
7. Brown A. J. *A study of queuing theory in low to high rework environments with process availability*. Available at: https://uknowledge.uky.edu/ms_etds/2 (accessed: 05.04.2018).
8. Bitran G. R., Dasu S. A. *Review of the Open Queueing Network Models of Manufacturing Systems*. Working papers 3229-90, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Sloan School of Management, 1990. 64 p.
9. *Mul'tiagentnye sistemy dlia upravleniia proizvodstvom v real'nom vremeni* [Multiagent systems to control on-line production]. Available at: http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011030204/presentation/20110303_04.pdf (accessed: 05.04.2018).
10. Zatonskii A. V. Modelirovanie tekhnologicheskogo uchastka obogatitel'noi fabрики v pakete MATLAB [Simulating technological site of oil dressing plant in MATLAB packet]. *Obogashchenie rud*, 2014, no. 4 (352), pp. 49-54.
11. Skobelev P. O. Mul'tiagentnye tekhnologii v promyshlennykh primeneniakh: k 20-letiiu osnovaniia Samarskoi nauchnoi shkoly mul'tiagentnykh sistem [Multiagent technologies in the industrial use: to the 20th anniversary of foundation of the Samara scientific school of multiagent systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 33-46.
12. Ivanova E. V., Zatonskii A. V. Otsenka i modelirovanie nauchno-issledovatel'skoi raboty studentov kak mnogoagentnoi sistemy [Assessment and modeling the research work of students as a multiagent system]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2009, no. 7, pp. 75-78.
13. Kirin Iu. P., Zatonskii A. V., Bekker V. F., Bil'fel'd N. V. Sintez i analiz optimal'nogo pozitsionnogo upravleniia tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva gubchatogo titana [Synthesis and analysis of optimal positional management of technological processes of spongy titanium production]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii*, 2010, no. 9, pp. 18-21.
14. Timochkina V. A., Ufimtseva V. N. Tekhnologicheskie problemy v protsesse vosstanovleniia gubchatogo titana [Technological problems in the process of spongy titanium reduction]. *Reshenie*, 2017, vol. 1, pp. 333-335.

The article submitted to the editors 21.05.2018

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zatonskiy Andrey Vladimirovich – Russia, 618404, Berezniki; Berezniki branch of Perm National Research Polytechnic University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Automation of Technology Processes; z Xenon@narod.ru.

Ufimtseva Valentina Nikitichna – Russia, 618404, Berezniki; Berezniki branch of Perm National Research Polytechnic University; Postgraduate Student of the Department of Automation of Technology Processes; nuf_13@mail.ru.

