

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА ГУБЧАТОГО ТИТАНА

Уфимцева Валентина Никитична

Аспирант, ПНИПУ

nuf_13@mail.ru

DESIGN OF IMITATING MODEL OF TITANIUM SPONGE PRODUCTION

V. Ufimtseva

Summary. The relevance and practical significance of improving the efficiency of production of titanium sponge in Russia and in the world are substantiated. Description of the areas of magnesium electrolysis and the reduction of titanium sponge as a technological object and control object are given. The problem of joint management of reduction and electrolysis stages in the production of titanium sponge is formulated. A system analysis of the processes in the areas of magnesium electrolysis and the recovery of titanium sponge is carried out. As a result objects of the system and the connections between them are identified. Assumptions about deviations from planned processes that may entail a decrease in efficiency are formulated to verification them by means of a computational experiment. A model of joint work of the plots was built with the previously developed tool for modeling multi-agent systems and queuing systems. As steps of this, the constructors of the base classes have been changed, additional private variables of derived classes have been introduced, special states and conditions for transitions between them have been specified, methods have been written to react to the model time for each object, and other necessary actions have been taken. A problem of achieving the stationary state of the model before the start of computational experiments is solved. The optimal initial conditions are determined to minimize auto-oscillations occur in the system. Software methods for suppressing self-oscillations that are absent on a real object are developed, including the use of configuration files that are different for different numbers of bottom and vacuum buckets in the model. An error of the model is determined based on experimental data which not used in the construction of the model, its error was estimated. It is shown that the model with the error of 7–8% can be applied to solving production control problems.

Keywords: titanium sponge, production, control, imitation modeling.

Аннотация. Обоснована актуальность и практическая значимость повышения эффективности производства губчатого титана в России и в мире. Приведено описание участков электролиза магния и восстановления губчатого титана как технологического объекта и объекта управления. Сформулирована проблема совместного управления участков восстановления и электролиза на производстве титановой губки. Проведен системный анализ процессов на участках электролиза магния и восстановления губчатого титана, позволяющий выявить объекты системы и связи между ними. Обоснованы предположения об отклонениях от плановых процессов, которые могут повлечь снижение эффективности, подлежащие проверке путем вычислительного эксперимента. На основе разработанного ранее средства моделирования мультиагентных систем и систем массового обслуживания построена модель совместной работы участков. Для этого изменены конструкторы базовых классов, введены дополнительные приватные переменные производных классов, указаны особые состояния и условия переходов между ними, написаны методы реакции на продвижение модельного времени для каждого объекта и сделаны остальные необходимые действия. Решена вспомогательная задача достижения стационарного состояния модели перед началом вычислительных экспериментов. Определены оптимальные начальные условия, при которых в системе возникают минимальные автоколебания. Разработаны программные приемы гашения автоколебаний, отсутствующих на реальном объекте, в том числе, использование конфигурационных файлов, разных при разном количестве донных и вакуумных ковшей в модели. С использованием данных, полученных на производстве, но не использованных при построении модели, оценена ее погрешность. Показано, что при погрешности, равной 7–8%, модель может быть применена для решения задач управления производством.

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

Титан и его сплавы являются очень важными конструкционными материалами, широко применяющимися в космической технике, авиа и автомобилестроении, строительстве, медицине и других отраслях промышленности [1]. В современных реалиях, титан может стать весомым аргументом политического диалога РФ и США. Ограничения в поставках титана и его сплавов может негативно отразиться на мировой экономике в целом.

Производством титана занимается не большое количество предприятий. На территории России в этой

отрасли задействовано 8 компаний. Одним из самых крупных является ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», единственная в мире титановая компания, осуществляющая полный цикл производства от переработки сырья до выпуска конечной продукции. В её число входят: слитки, биллеты, слябы, крупные штампованные поковки дисков и лопаток авиационных двигателей, сложноконтурные поковки для авиации, шассийные и конструкционные штамповки, раскатные кольца, профили, бесшовные и сварные трубы и другое. В составе корпорации две промышленные площадки: «ВСМПО» в городе

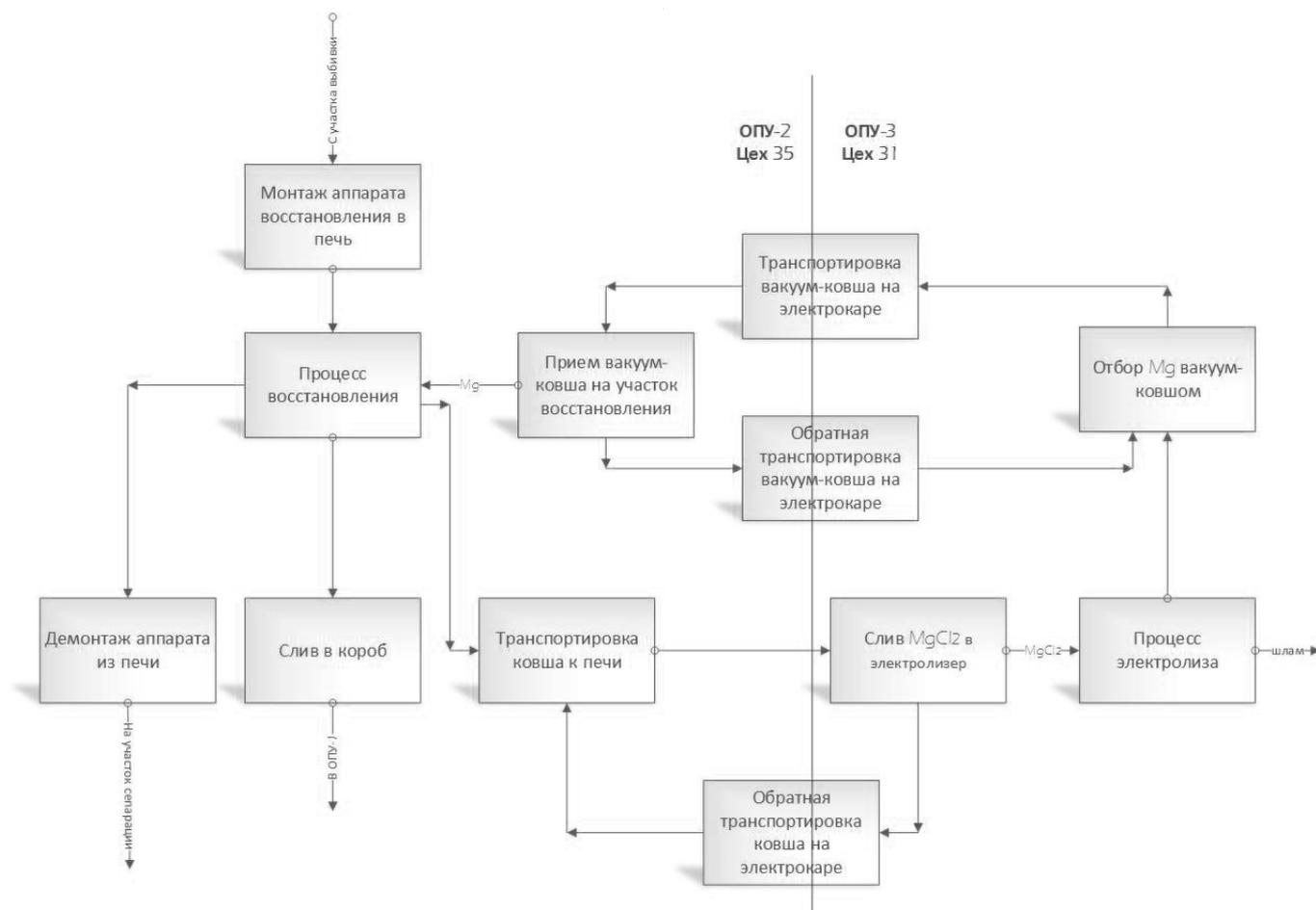


Рис. 1. Схема процессов, протекающих между ОПУ-2 и ОПУ-3

Верхняя Салда Свердловской области и «АВИСМА», филиал в городе Березники Пермского края, которые связаны между собой единой технологической цепочкой. Ежегодно компания производит около 40 тыс. тонн металла, из них 70% отгрузки идет на экспорт, на рынки 50 стран, в том числе на американский рынок. В США среди контрагентов корпорация Boeing (35% используемого титана — российского происхождения) и производитель авиадвигателей Pratt & Whitney. В Европе российский титан обеспечивает 65% потребностей французской Airbus, поставляется производителям авиадвигателей британской Rolls-Royce и французской Snecma. Кроме того, совместное российско-американское предприятие Ural Boeing Manufacturing (расположено в Свердловской области) выпускает для Boeing и Airbus заготовки и детали из титана [2,3]. Следовательно, повышение эффективности и решение проблем титанового производства в России является важной задачей общегосударственного уровня.

Наиболее важными и сложными производственными процессами производства титана являются восстановление и электролиз. Их можно отнести к классу сложных

объектов управления [4,5]. На производстве ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» существует проблема несогласованности планирования деятельности основных производственных участков (ОПУ) цехов № 31 и № 35. Эта проблема подробно описана нами в статье [6]. Вкратце, установление планов для участков по отдельности приводит к тому, что от смены к смене меняются подача магния на участок ОПУ-2 восстановления губчатого титана и хлорида магния — на участок электролиза ОПУ-3. Если электрокары, перевозящие хлорид магния, выстраиваются в очередь на участке электролиза, для обеспечения непрерывности производства сливы из аппаратов восстановления приходится производить в короба, затем охлаждаемые и передаваемые на участок ОПУ-1 для дробления и прочей подготовки к электролизу магния. Это приводит к удорожанию производства.

Глобальной задачей нашего исследования является поиск возможных вариантов исключения ОПУ-1 из технологической схемы производства, для чего необходимо совместное планирование процессов в ОПУ-2 цеха № 35 и ОПУ-3 цеха № 31. Одним из возможных инструментов исследования проблем таких производственных

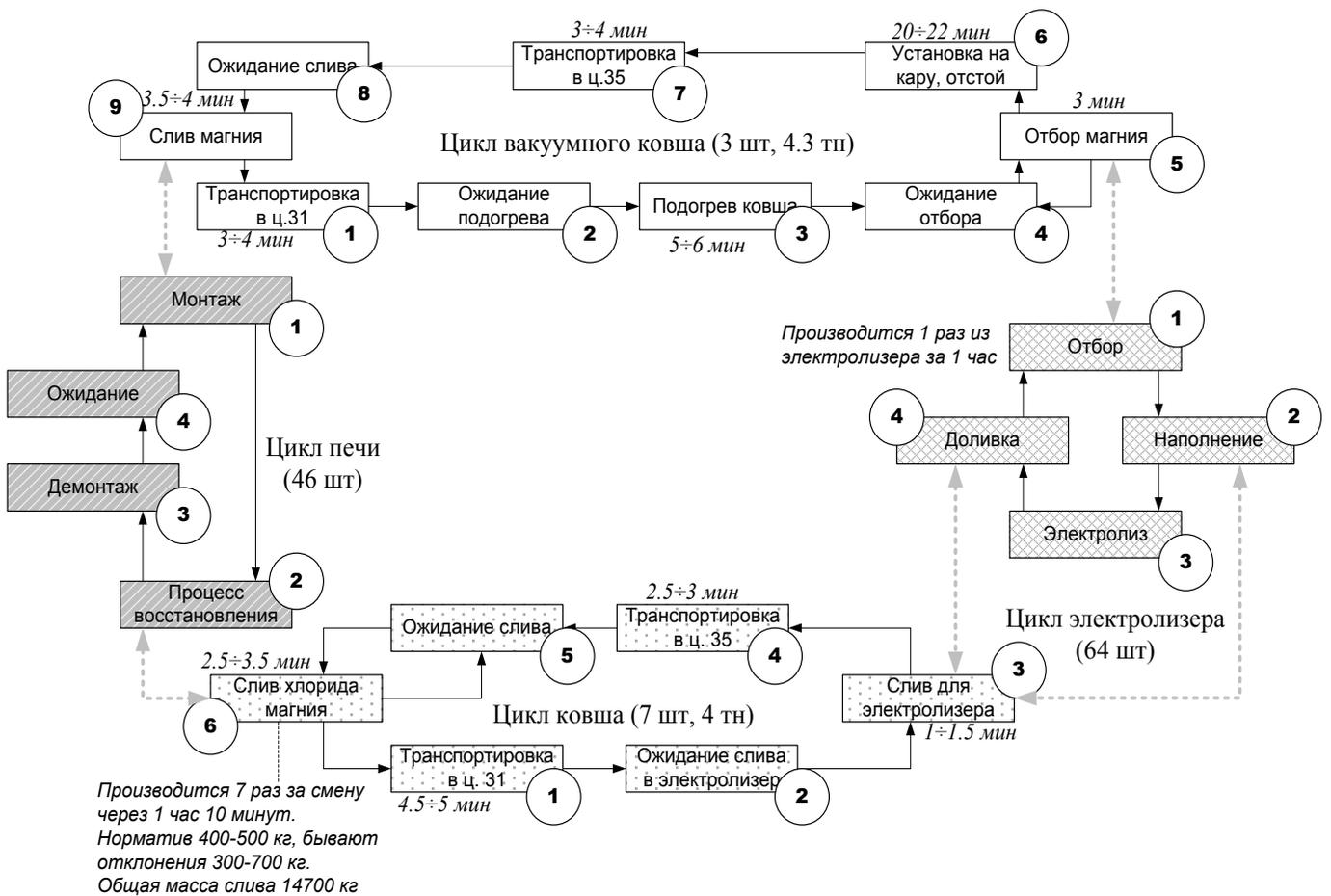


Рис. 2. Технологическая схема процессов, протекающих в ОПУ-2 и ОПУ-3

систем является имитационное моделирование систем массового обслуживания (СМО, queuing system) [7,8], эффективность которого при изучении и оптимизации предприятия отмечают как зарубежные [9,10], так и отечественные источники [11].

В статье [12] предложено использовать специально разработанную систему имитационного и мультиагентного моделирования для описания совместной работы участков электролиза и восстановления, показана принципиальная работоспособность подхода. **Целью** настоящей работы является окончательное оснащение модели, определение ее погрешности и исследование особых условий ее работы.

Схематично процессы и транспортные потоки между ОПУ показаны на рис. 1. Система включает два кольцевых движения электрокар с вакуум-ковшами, в которых расплавленный магний перевозится на ОПУ-2, и электрокар с донными ковшами, в которых хлорид магния перевозится на ОПУ-1. Анализ показывает, что лимитирующими могут быть различные процессы, от задержки электрокар до физической нехватки магния в электро-

лизерах, потребного для процессов восстановления. К примеру, это нехватка может возникнуть, когда одна смена всеми силами пытается выполнить собственный план (без увязки его с планами других смен и другого ОПУ), оставляет в электролизерах слишком мало жидкого металла, от чего их производительность несколько падает. В этом случае следующая смена не может выполнить план, и процессы на ОПУ-2 тормозятся [13,14,15].

Для каждого процесса выявлены его составляющие (рис. 2). Путем натурных измерений [6] определены, в первом приближении, параметры модели и их разброс. Определено несколько десятков возможных состояний объектов модели и условия перехода между ними, описанные нами ранее в [12].

Для реализации модели, как описано в [12], на языке С++ разработаны классы всех объектов («донные ковши», «вакуумные ковши», «печи» и «электролизёры»), являющиеся наследными от одного базового класса. Для каждого из объектов определены собственные приватные переменные, например для класса «донный ковш» таковыми стали:

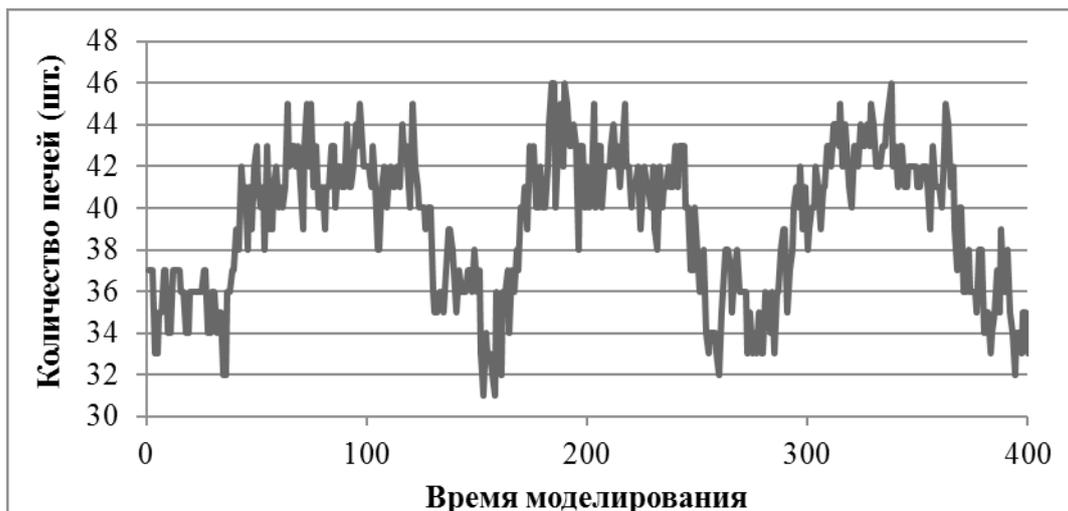


Рис. 3. Количество печей, находящемся в состоянии № 3, после «разгона модели»

- ◆ вместимость, кг;
- ◆ остаток вместимости, при котором принимается решение о транспортировке в 31 цех, кг;
- ◆ количество хлорида магния в данный момент времени, кг.

Статической переменной класса является номер донного ковша. Начальное значение статической переменной присваивается вне описания или конструктора класса. Она используется (увеличивается) конструктором класса для осуществления нумерации ковшей (изменения соответствующей защищенной переменной базового класса).

Поскольку для реализации модели требуется создать не инициализированный массив донных ковшей, конструктор данного класса не имеет параметров. Параметры конструктору базового класса в нем передаются явным образом до выполнения тела конструктора производного класса. В конструкторе класса определяются следующие особые состояния объекта «донный ковш» и их порядковые номера:

- ◆ Транспортировка в 31 цех (состояние № 1);
- ◆ Ожидание слива $MgCl_2$ (состояние № 2);
- ◆ Слив $MgCl_2$ (состояние № 3);
- ◆ Транспортировка в 35 цех (состояние № 4)
- ◆ Ожидание слива из печи (состояние № 5)
- ◆ Слив из печи (состояние № 6)

Переменные «вместимость» и «остаток» устанавливаются равными значениям, считанным из настроечного файла, переменная «количество» устанавливается в 0 (донный ковш в начале моделирования пуст). Конструктор добавляет каждый донный ковш в список объектов модели, вызывая функцию класса списка объектов.

Как и остальные классы модели, класс донного ковша содержит функцию, вызываемую один раз (после конструктора) для определения значений изменяемых факторов модели, и функцию, вызываемую при продвижении времени модели.

Аналогичный анализ и определение особых состояний были проведены и для каждого из остальных объектов: «вакуумные ковши», «печи» и «электролизёры».

По окончании анализа встала проблема задания таких начальных условий для всех объектов, чтобы моделируемый процесс как можно более походил на устоявшийся (установившийся за десятки лет) производственный процесс.

Первоначально для печей восстановления было принято следующее начальное условие:

- ◆ 2/3 печей находятся в процессе восстановления (состояние 3), у них по линейному закону устанавливается остаток сливов (от 18800 до 0);
- ◆ остальные печи находятся в процессе ожидания монтажа (состояние 6).

Это привело к существенным колебаниям загрузки ОПУ-2 (Рис. 3).

В системах массового обслуживания колебания загрузки не редкость, они могут быть обусловлены внутренними свойствами системы, а не неудачными начальными условиями. Для достижения минимальных колебаний необходим подбор доли печей, на начальный момент времени находящихся в состоянии «процесс восстановления».

Таблица 1. Колебания загрузки в зависимости от изменения доли печи

Доля печей	0,75	0,5	0,33	0,15
Максимальное количество печей	48	48	50	51
Минимальное количество печей	31	25	15	6
Разность между максимальным и минимальным количеством печей (разброс)	17	23	35	45

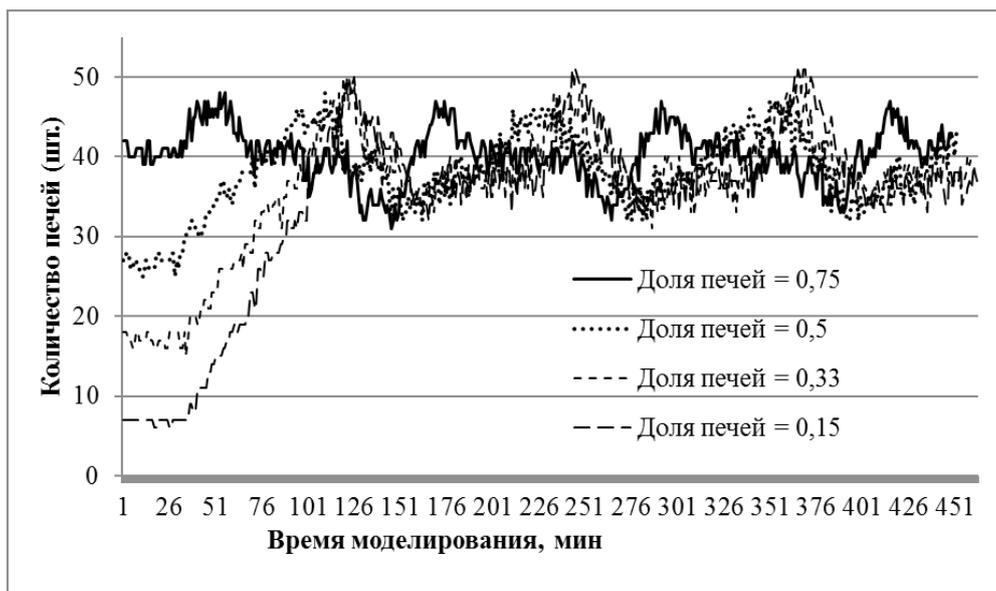


Рис. 4. Загрузка печей

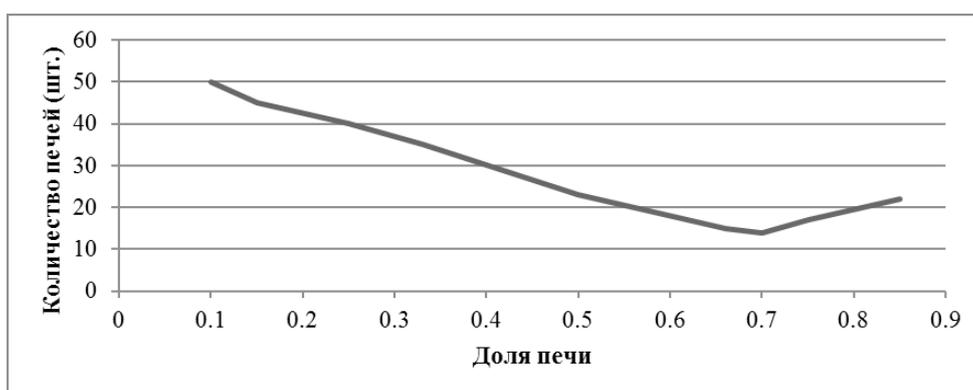


Рис. 5. Зависимость разброса от начальной доли печей на восстановлении

С помощью изменения константы в функции выводим возможные варианты доли печей необходимого состояния. Изменение параметра приводит к следующим загрузкам печей (Рис. 4, Табл. 1)

Зависимость разброса от начальной доли печей, находящегося в состоянии восстановления (№ 3), представлена на рис. 5.

Таким образом, оптимальное значение параметра принимаем равным 0.7.

Для выхода модели на режим без автоколебаний требуется длительное время моделирования. Эксперименты показали, что при моделировании более 20 лет автоколебания в системе сглаживаются (Рис. 6, Рис. 7)



Рис. 6. Автоколебания в системе через 3 года работы модели



Рис. 7. Автоколебания в системе через 4 года работы модели

Чтобы исключить длительный прогон модели перед, собственно, моделированием, был сделан конфигурационный файл, в котором сохраняются значения параметров ковшей и печей: состояние, остаток, сколько нужно слить и сколько осталось слить и время, через которое начнется событие. После формирования файла все имитационные эксперименты проводятся с использованием полученных начальных значений. Файл формируется один раз для каждого количества донных и вакуумных ковшей, так как от него зависит количество записей в файл. После формирования файла все имитационные эксперименты проводятся с использованием полученных начальных значений.

Продолжительность достижения установившегося режима зависит от соотношения количества работаю-

щих электролизеров и печей восстановления. Например, при 64 печах и 56 электролизерах автоколебания в системе прекращаются уже через 3 суток (Рис. 8).

Для оценки погрешности модели результаты моделирования сравнили с наборами данных, полученных с производства. В частности, для этого результаты моделирования сравнили со значениями из режимных карт, полученных на производстве. Сравнялось количество слитого дихлорида магния за смену, кг (Табл. 2), поскольку это значение не входит в состав исходных данных программы и никак не использовалось при ее оснащении. На основании этого можно считать, что полученная погрешность действительно характеризует погрешность модели.

Таблица 2. Экспериментальные данные о процессах восстановления

Режимная карта 1		Режимная карта 2	
Количество израсходованного $TiCl_4$ на конец смены	Количество слитого $MgCl_2$ на конец смены	Количество израсходованного $TiCl_4$ на конец смены	Количество слитого $MgCl_2$ на конец смены
2100	2100	3000	3000
4500	4500	6000	6000
7300	7300	7600	7600
9900	9900	10273	10200
11300	11900	11694	11694



Рис. 8. Процесс выхода модели на статический режим

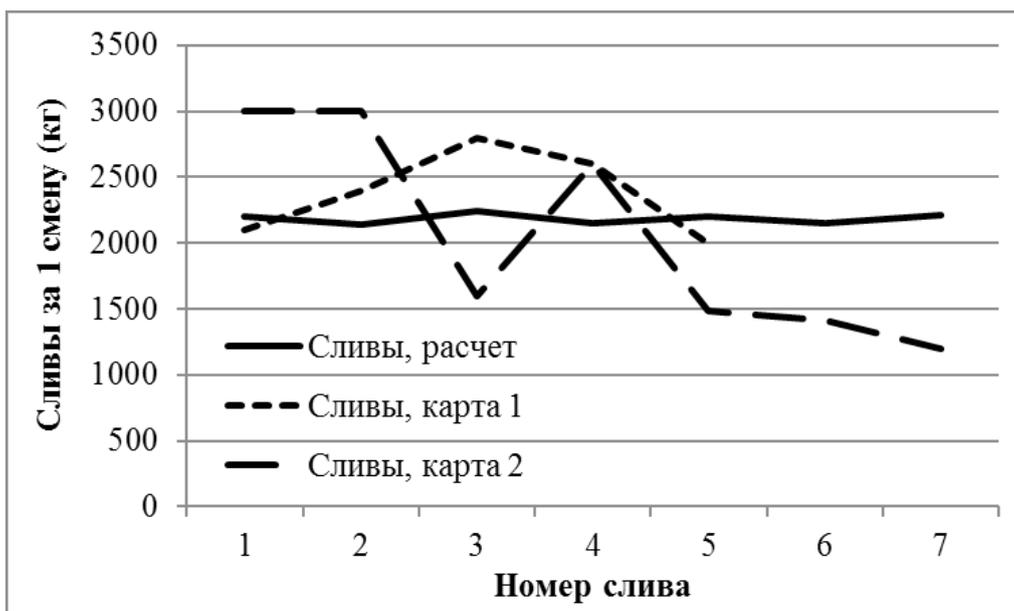


Рис. 11 Сравнение реальных и расчетных сливов в короба за 1 смену

В ходе имитационных экспериментов получили среднее за смену (8 часов) количество слитого дихлорида магния 2185 кг. Это же значение согласно первой карточки равно 2380 кг, согласно второй — 2043 кг. График сравнения реальных и программных результатов в зависимости от номера представлен на Рис. 11. Естественно, что модель, находящаяся в установленном режиме, выдает более равномерные данные о сливах, чем они есть в реальности. Печевой, производя слив, руководствуется своим представлением о том, что в ковш или короб вместо дихлорида полился металлический магний, и как только это случилось, прекращает слив. Однако общая сумма сливов определяется количеством подаваемого в автоматическом режиме тетраоксида титана и отличается от идеального массового баланса только на величину ошибки печевого. После усреднения колебаний сливов, производившихся человеком, получили при сравнении с первой режимной картой значение относи-

тельной погрешности модели 8,11%, со второй — 7,1%. Это говорит о том, что модель и реализующее ее программное обеспечение обладают невысокой погрешностью, и получаемые значения достаточно близки к данным о реальном производстве.

Таким образом, цель, поставленная в данной статье, достигнута. На основе ранее разработанного средства имитационного и мультиагентного моделирования построена совместная модель работы двух участков производства губчатого титана. Предложены мероприятия по выводу модели на статический режим, из которого можно начинать вычислительные эксперименты по изучению влияния параметров модели на производительность и, в конечном итоге, синтезу системы совместного управления участками. Оценена погрешность модели, которая вполне позволяет подобные исследования производить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство цветных металлов [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/proizvodstvotsvetnykh-metallov/542-proizvodstvo-titana.html>
2. Поставки титана в США не запрещены [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://expert.ru/ural/2018/16/postavki-titana-v-ssha-ne-zapreshenyi/>
3. Российская компания, на которую полагаются Boeing и Airbus [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://inosmi.ru/economic/20160424/236265141.html>
4. Кирин Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф., Бильфельд Н. В. Качественный анализ динамики позиционного регулирования температуры процесса восстановления титана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 10. С. 54–56. Кирин Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф., Бильфельд Н. В. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана // Титан. 2003. № 2.
5. Системный анализ процессов на участках восстановления и сепарации в производстве титана / Т. И. Шихарева, В. Н. Уфимцева // Молодежная наука в развитии регионов. 2017. Т. 1 С. 181–184
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. Затонский А. В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: Инфра-М: ИЦ РИОР, 2013. 136 с.
8. Brown, A. J., A study of queuing theory in low to high rework environments with process availability / Theses and Dissertations — Manufacturing Systems Engineering. 2015. URL: https://uknowledge.uky.edu/ms_etds/2
9. Bitran G. R., Dasu S. A Review of the Open Queueing Network Models of Manufacturing Systems // WP #3229–90-MSA, 1990. 64 p.
10. Кирин Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф. Построение адаптивной системы управления технологическими процессами в производстве губчатого титана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 2. С. 1–7.
11. Затонский А. В., Уфимцева В. Н. Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 4. С. 56–62.
12. Рабочая инструкция печевого на восстановлении и дистилляции титана и редких металлов утв. Директором по производству АВИСМА 2013 г. — 249с.
13. Производство магния — сырца и хлора. Технологическая инструкция утв. Директором по науке и технологии АВИСМА 14 февраля 2013 г. — 169 с.
14. Производство титана губчатого магниетермическим способом. Технологическая инструкция утв. Директором по науке и технологии АВИСМА 2013 г. — 116 с.

© Уфимцева Валентина Никитична (nuf_13@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»