

## МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЧАСТКОВ ПРОИЗВОДСТВА ГУБЧАТОГО ТИТАНА

**А.В. Затонский<sup>1</sup>, В.Н. Уфимцева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Березниковский филиал, г. Березники, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия

Обоснована необходимость повышения эффективности систем управления производством губчатого титана по методу Кроля. Произведен системный анализ совместной работы участков электролиза магния и восстановления губчатого титана. Поставлена задача исключения нарушений в обеспечении участка восстановления донными ковшами, приводящих к снижению эффективности производства. Для исследования возможности решения задачи разработана программная библиотека имитационного и многоагентного моделирования, с помощью которой создана модель действующего производства. Оснащение модели произведено с использованием натуральных измерений, статистические распределения которых из-за недостаточного количества данных приняты равномерными. С использованием программной модели произведено исследование влияния ряда управляемых факторов на производительность участков, время ожидания донных ковшей в очереди на слив хлорида магния и процента нарушений в обеспечении участка восстановления донными ковшами. По итогам первой части исследований большинство факторов отброшено как малозначительные с точки зрения их влияния на результат. Далее исследовано совместное влияние таких факторов, как количество донных ковшей, время слива хлорида магния из аппарата восстановления губчатого титана и время транспортировки донного ковша на участок электролиза магния. Установлено, что совместное изменение факторов производит синергетический эффект, то есть существенно превосходит реакции модели на независимые их изменения. В первом приближении определены границы реакций факторов, при которых нарушения процесса прекращаются. Сделан вывод о том, что качественные результаты исследования могут считаться адекватными, но для уточнения количественных результатов необходимо большее количество измерений и уточнение статистических распределений случайных величин.

*Ключевые слова:* производство губчатого титана, имитационная модель, вычислительный эксперимент, оптимизация, управление.

Основным способом производства титана в России и за рубежом является восстановление тетрахлорида титана магнием по способу Кроля. Таким образом производится титановая губка на предприятиях бывшего СССР (в том числе в Казахстане и на Украине), в Китае, США и Японии [1]. Современные усилия по разработке альтернативных технологий, основанных в основном на восстановлении диоксида титана, пока находятся на стадии лабораторных и опытно-внедренческих исследований [2, 3]. Вопросы производства губчатого титана близки к стратегической и оборонной тематике, поэтому в научных статьях в журналах (кроме РФ) освещены слабо. Советская технология производства описана в классической монографии [4] и является сложной, энергозатратной и многопередельной. Крупнейшим производителем титановой губки в мире (порядка 40 тыс. т в год) является корпорация «ВСМПО-Ависма», собственно производство губки осуществляется в филиале «Ависма» в г. Березники Пермского края.

На этом предприятии существует проблема рассогласования планов работы двух основных производственных участков – восстановления титана (ОПУ-2, цех 35) и электролиза магния (ОПУ-3, цех 31). Из-за стохастических отклонений, вызванных независимыми друг от друга планами и стараниями персонала выполнить их любой ценой, возникают сбои в обеспечении ОПУ-2 донными ковшами. При этом для выполнения плана персонал ОПУ-2 вынужден сливать расплав хлорида магния в короба с последующей длительной и дорогой подготовкой его к электролизу (рис. 1).

Авторами в предыдущих работах предложено решать данную проблему путем управления по модели совместной работы участков или создания системы поддержки принятия решений (СППР)

диспетчера по аналогии с [5]. В мировых источниках использование имитационных моделей в управлении производством освещены достаточно широко (например, [6]) и позволяет получать положительные эффекты на всех стадиях жизненного цикла [7]. Подобные попытки для титанового производства также производились [8, 9]. В первой из работ на языке Фортран написана имитационная модель совместной работы участков восстановления и сепарации губчатого титана. И модель, и ее реализация выполнены в духе, свойственном тем годам (монография опубликована в 1991 г.), в постановочной части есть неясности в смысле принятых допущений об элементарных ячейках системы массового обслуживания (СМО), не приведены сведения о погрешности модели, полученные путем сравнения результатов расчетов с данными действующего производства. Участок электролиза магния в монографии не рассмотрен. Во второй работе очень скупо описана сама модель вспомогательных подразделений, даже не приведена информации о ее погрешности. Вкупе с особенностями системы моделирования AnyLogic (включая высокую лицензионную стоимость) это привело авторов к идее разработки собственной библиотеки моделирования и реализации в ней модели совместной работы двух ОПУ [10]. Оснащение модели произведено на основе данных, полученных непосредственным измерением таймингов процессов на участках и между ними, выполненных в 2016 году [11]. Показано, что модель имеет погрешность порядка 7–8 % и может использоваться в составе СППР, то есть адекватно отражает процессы, происходящие на участках.

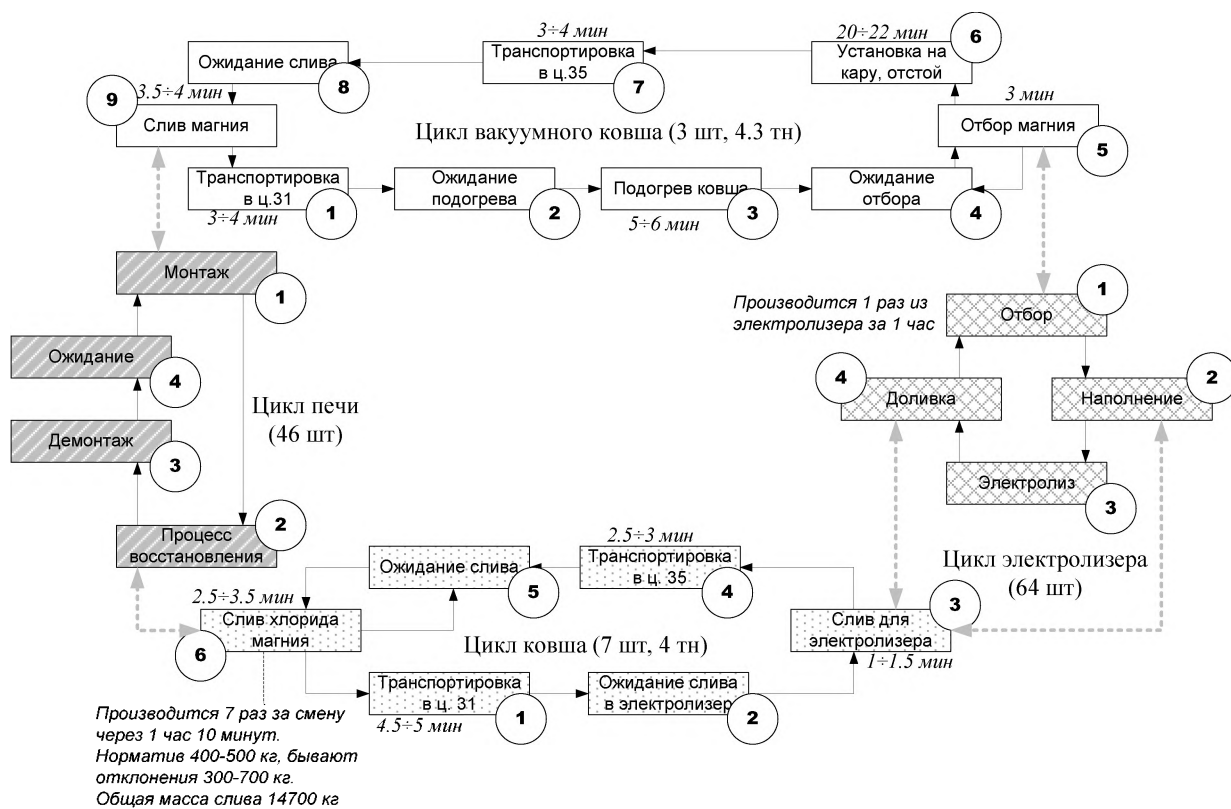


Рис. 1. Системный анализ совместной работы ОПУ-2 и ОПУ-3

Целью настоящей статьи является применение разработанной программной модели для поиска сочетаний условий, при которых сливы в короба исключаются. Из всех 46 факторов модели, большая часть которых упомянута на рис. 1, в качестве управляемых были выбраны следующие:

- количество донных ковшей ( $x_1$ ) при принятом допущении, что каждый ковш бесперебойно комплектуется электрокарой;
- количество вакуумных ковшей ( $x_2$ );
- максимальное количество одновременно монтируемых аппаратов восстановления ( $x_3$ );
- остаток свободной вместимости, при достижении которого донный ковш отправляется на электролиз, не дожидаясь его полного заполнения, кг ( $x_4$ );

## Краткие сообщения

- максимальное и минимальное время транспортировки донного ковша в ОПУ-3, мин ( $x_5$ );
- максимальное и минимальное время отстоя вакуумного ковша, мин ( $x_6$ );
- максимальное и минимальное время монтажа аппарата восстановления, мин ( $x_7$ );
- максимальное и минимальное время слива хлорида магния в донный ковш, мин ( $x_8$ ).

Выбор факторов обусловлен их важностью для производства и управляемостью, в отличие от многих других. Например, объем донного ковша, вместимость вакуумного ковша, вместимость донного ковша, количество печей восстановления, количество электролизеров, количество магния, заливаемого из миксера в реторту, нельзя легко изменять. Это привело бы к необходимости заменить оборудование, чтобы увеличить или уменьшить его объем, вместимость, а также увеличить или уменьшить количество оборудования, площади цехов и т. д.

В качестве реакций модели были выбраны следующие:

- производительность участка восстановления, т (количество сливов хлорида магния в донные ковши и в короба) ( $y_1$ );
- в том числе количество сливов в короба, т ( $y_2$ );
- среднее время ожидания в очереди на слив из донного ковша в ОПУ-3, мин ( $y_3$ ).

С каждым выбранным фактором были проведены имитационные эксперименты. При этом сначала изменяли только один фактор, другие оставляли неизменными. Начальные значения факторов были установлены такими, какие они есть на действующем производстве:  $x_1 = 7$ ,  $x_2 = 3$ ,  $x_3 = 2$ ,  $x_4 = 200$  кг,  $x_5 = 4,5 \dots 5$  мин,  $x_6 = 20 \dots 22$  мин,  $x_7 = 70 \dots 80$  мин,  $x_8 = 2,5 \dots 3,5$  мин, все распределения равномерные.

Так как модель совместной работы участков стохастическая, каждый прогон модели выдает результат, отличающийся от всех других. Поэтому итоговые результаты получали методом установления, повторяя запуск модели с одними и теми же исходными данными до тех пор, пока математическое ожидание результата не перестанет изменяться в пределах 5 % (в соответствии с рекомендациями [12]).

Наиболее влияющим на количество (тоннаж) сливов в короба  $y_2$  оказалось количество донных ковшей  $x_1$ . Из рис. 2 видно, что эта зависимость имеет выраженный нелинейный характер, то есть тоннаж сливов в короба быстро растет с уменьшением количества ковшей. Кроме того (на графике не отражено), при этом растет и разброс значения  $y_2 = \bar{y}_2 \pm \Delta y_2$ .

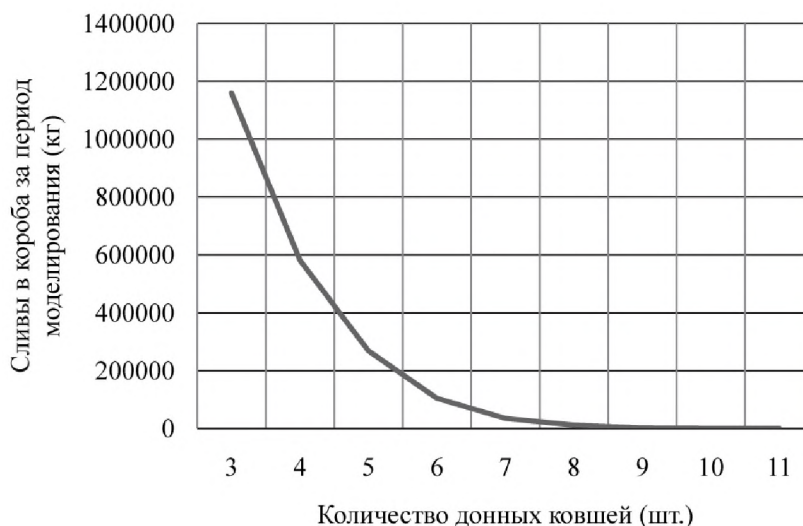


Рис. 2. Зависимость среднего тоннажа слива в короба от количества донных ковшей

При значениях  $x_1 < 6$  изменениями других факторов не удастся достичь исключения сливов в короба, во всем диапазоне возможных значений  $x_2 \dots x_8$  вероятность необходимости слива остается положительной. При  $x_1 = 6 \dots 8$  изменение других факторов модели позволяет иногда добиться нулевой вероятности сливов, что подробнее изложено ниже. При  $x_1 > 8$  вероятность сливов в короба можно считать исчезающе малой. Количество донных ковшей влияет также на другие реак-

ции модели. Так, среднее ожидание в очереди на слив хлорида магния в ОПУ-3 меняется почти линейно  $y_3 \approx 1500 - 84 \cdot x_1$  с высоким коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,91$ . Это хорошо соотносится с данными других авторов о том, что даже в больших системах массового обслуживания (СМО) времена ожидания изменяются линейно в зависимости от производительности, если задано равномерное распределение. Как известно, теорема Колмогорова для времени ожидания в очереди дает нелинейную зависимость [13], однако она справедлива только для экспоненциального и нормального распределения. В данном случае количество измерений было вынужденно произведено не настолько объемным, чтобы по результатам можно было бы определить и статистическое распределение тоже. Поэтому для пробных расчетов выбрали наихудшее, в некотором смысле, равномерное распределение, а переход к распределениям других видов исследовали отдельно.

Путем экспериментов определили, что на средние реакции модели практически не влияют вариации факторов  $x_2, x_4, x_6$ . Интересно, что при этом увеличение  $x_4$  вызывает увеличение разброса реакций  $\Delta y_2$  и  $\Delta y_3$ . Рост фактора  $x_5$  с 1,75 до 7,5 мин вызывает линейный рост  $y_2$ , но практически не влияет на  $y_1$  и  $y_3$  (а только на  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_3$ ). С увеличением и уменьшением фактора  $x_7$  реакции модели тоже практически не изменяются. При среднем времени монтажа аппарата восстановления, равном 45 мин, слив в короба – 20 567 кг за период моделирования, а при 95 мин – 38 033 кг. При этом на общую производительность ОПУ-2  $y_1$  этот фактор влияет ожидаемо линейно. Кроме того, данный фактор все же непросто изменить, так как есть определенные нормы и технические инструкции, и сокращение времени монтажа вызовет значительные изменения в сопряженных процессах производства. При увеличении времени слива  $x_8$  количество сливов в короба растет сверхлинейно с показателем порядка 1,5. При количестве донных ковшей 7 и среднем времени слива, равном  $x_8 = 1,5$  мин, получаем количество сливов  $y_2 = 2273$  кг, а при  $x_8 = 4$  мин сливы в короба достигают  $y_2 = 109$  т, то есть примерно треть всех сливов участка.

В итоге, можно сделать вывод, что основными управляемыми факторами для дальнейшего исследования являются следующие:

- 1) количество донных ковшей ( $x_1$ );
- 2) время транспортировки донного ковша в 31-й цех ( $x_5$ );
- 3) время слива хлорида магния в донный ковш ( $x_8$ ).

Для них были произведены совместные изменения факторов попарно. Установлено, что совместное изменение  $x_5$  и  $x_8$  оказывает большее влияние на сливы в короба, чем независимое (см. таблицу).

По описанной выше схеме счета на установление произведено несколько десятков вычислительных экспериментов (то есть десятков тысяч прогонов модели). Обнаружено, что устойчивая граница значений факторов, при которых вероятность сливов в короба становится чрезвычайно малой, находится в окрестности  $x_1 \geq 8$ ,  $x_2 \leq 3 \dots 3,5$  мин,  $x_3 \leq 2,5 \dots 3,5$  мин. Усредненный тоннаж сливов в короба  $y_2$  при  $x_3 = 2,5 \dots 3,5$  мин приведен на рис. 3.

Найдены условия, при которых сливы в короба уменьшаются до нуля, но при этом производительность участка восстановления и время ожидания слива в электролизер практически не меняются по сравнению с исходными значениями. При этом достаточно установления следующих значений факторов:

- количество донных ковшей  $x_1 = 9$ ;
- уменьшение среднего времени транспортировки донного ковша  $x_5$  до 225 (с);
- уменьшение среднего времени слива хлорида магния в донный ковш за счет роста давления аргона в аппарате до  $x_8 = 162$  с.

Как отмечено выше, для исследования достаточно произвольно выбрано равномерное распределение случайных величин. Исследуем, как изменится результат при переходе к другим распределениям. Например, при так называемых *редких событиях*, происходящих в СМО, их принято моделировать распределением Пуассона:

$$P(\zeta = k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda),$$

где  $\lambda$  – математическое ожидание,  $k = 0, 1, 2, \dots$  – носитель распределения. Этим распределением хорошо описывается количество обращений в справочную службу, количество дефектов

## Краткие сообщения

в потоке однородных изделий (или в одном протяженном изделии, наподобие рулона ткани), количество изюминок в выпечке и т. д. При количестве донных ковшей  $x_1 = 7$  зависимость сливов в короба от распределения среднего времени слива различная (рис. 4). Здесь принят носитель распределения  $k = 2$ .

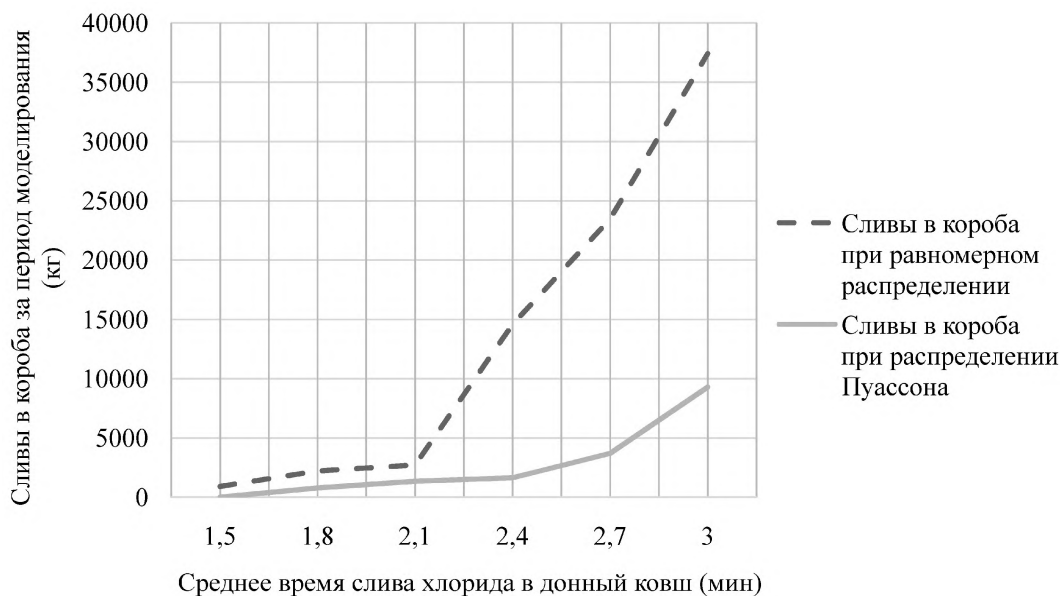
Очевидно, что до некоторого периода статистика сливов почти не зависит от вида распределения, однако при увеличении математического ожидания более «плотное» вокруг среднего значения  $\lambda$  распределение Пуассона начинает оказывать влияние на реакцию модели.

Результат при совместном изменении времени транспортировки донного ковша  $x_2$  и времени слива хлорида магния в донный ковш  $x_8$

№ эксперимента	Значения факторов модели модели							Результат моделирования		
	Количество донных ковшей (шт.)	Мин. время трансп. донного ковша в 31-й цех (мин)	Макс. время трансп. донного ковша в 31-й цех (мин)	Среднее значение (мин)	Мин. время слива хлорида магния в донный ковш (мин)	Макс. время слива хлорида магния в донный ковш (мин)	Среднее значение (мин)	Производительность участка (т)	Сливы в короба за период моделирования (кг)	Ожидание слива в электролизер (ед. времени)
Начальное значение	7	4,5	5	4,75	2,5	3,5	3	881,3	37416	11146
1	7	4	4,5	4,25	2,2	3,2	2,7	883,1	23453	12413
2	7	3,5	4	3,75	1,9	2,9	2,4	883,9	14599	12240
3	7	3	3,5	3,25	1,6	2,6	2,1	879,6	2722	10656
4	7	2,5	3	2,75	1,3	2,3	1,8	879,3	2215	14328
5	7	2	2,5	2,25	1	2	1,5	884	906	13766
6	7	5	5,5	5,25	2,8	3,8	3,3	883,4	48923	12024
7	7	5,5	6	5,75	3,1	4,1	3,6	883,9	55246	13046
8	7	6	6,5	6,25	3,4	4,4	3,9	880	86596	11779
9	7	6,5	7	6,75	3,7	4,7	4,2	883	123784	8150
10	7	7	7,5	7,25	4	5	4,5	883	170876	8885



Рис. 3. Зависимость сливов в короба от совместного изменения количества и времени транспортировки донных ковшей

Рис. 4. Влияние выбора вида статистического распределения на  $u_2$ 

Таким образом, цель, поставленная в данной статье, **достигнута**. Построенная и оснащенная авторами ранее имитационная модель совместной работы участков электролиза магния и восстановления губчатого титана филиала «Ависма» дополнена средствами организации вычислительных экспериментов (счета на установление). С ее помощью исследовано влияние на критически важные результаты работы системы восьми потенциально управляемых факторов из 46. Показано, что с точки зрения исключения сливов в короба наиболее значимыми являются три фактора: количество донных ковшей, время транспортировки донных ковшей и время слива хлорида магния из аппарата восстановления. Обнаружено, что их совместное изменение дает синергетический эффект, существенно превышающий эффект от независимого изменения значений факторов. В первом приближении определены границы значений факторов, при которых сливы в короба исключены. Следует отметить, что исследование вынужденно базировалось на достаточно ограниченном количестве натуральных измерений, и для количественного уточнения результатов может понадобиться их расширение, хотя качественные результаты сомнения не вызывают.

#### Литература

1. Нечаев, В.Н. Тепломассоперенос в реакторе получения пористого титана магнетермическим способом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Нечаев. – Пермь, 2014. – 18 с.
2. Powder metallurgy of titanium – past, present, and future / Z.Z. Fang, J.D. Paramore, P. Sun et al. // *International Materials Reviews*. – 2018. – Vol. 63, no. 7. – P. 407–459. DOI: 10.1080/09506608.2017.1366003
3. Direct Electrochemical Reduction of Solid  $TiO_2$  in  $[BMIM]BF_4-CaCl_2$  Ionic Liquid / Jie Chen Mu, Xu Dong Zhang, Li Peng Zhang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 492. – P. 248–252. – [www.scientific.net/AMM.492.248](http://www.scientific.net/AMM.492.248). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.492.248
4. Титан / В.А. Гармата, А.Н. Петрунько, Н.В. Галицкий и др. – М.: Металлургия, 1983. – 559 с.
5. Application of queuing theory in production-inventory optimization / R. Rashid, S.F. Hoseini, M.R. Gholamian, M. Feizabadi // *Journal of Industrial Engineering International*. – 2015. – Vol. 11. – P. 485–494. DOI: 10.1007/s40092-015-0115-9
6. Mourtzis, D. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges / D. Mourtzis, M. Doukas, D. Bernidaki // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 25. – P. 213–229. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.032
7. Затонский, А.В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования / А.В. Затонский. – М.: Инфра-М: ИЦ РИОР, 2013. – 136 с.
8. Сулеев, Д.К. Автоматизированная система управления технологическими процессами титанового производства / Д.К. Сулеев. – Алма-Ата: Гылым, 1991. – 84 с.

9. Насыйров, Я.А. Опыт применения MATLAB и ANYLOGIC для разработки систем поддержки принятия решений при планировании производства / Я.А. Насыйров // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика»: тр. конф.: в 2 т. – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. – С. 236–239.

10. Затонский, А.В. Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов / А.В. Затонский, В.Н. Уфимцева // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2018. – № 4. – С. 56–62. DOI:10.24143/2072-9502-2018-4-56-62

11. Шихарева, Т.И. Анализ процессов на участках восстановления и сепарации в производстве титана / Т.И. Шихарева, А.Е. Лекомцев // Решение. – 2017. – Т. 1. – С. 340–342.

12. Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды / А.В. Затонский, С.А. Варламова, А.В. Малышева, А.А. Мясников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – № 2 (39). – С. 87.

13. Боев, В.Д. Исследование адекватности GPSS WORLD и Any Logic при моделировании дискретно-событийных процессов / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Березники; zxenon2000@yandex.ru.

**Уфимцева Валентина Никитична**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; nuf\_13@mail.ru.

*Поступила в редакцию 10 августа 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr190411

## RESEARCH OF JOINT WORK OF TITANIUM SPONGE PLOTS BY A MODEL

**A.V. Zatonskiy**<sup>1</sup>, zxenon2000@yandex.ru,  
**V.N. Ufimtseva**<sup>2</sup>, nuf\_13@mail.ru

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation,

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The necessity of increasing the efficiency of production management systems of titanium sponge by the method of Krol is justified. A system analysis of the joint operation of magnesium electrolysis stage and the reduction of titanium sponge stage is performed. The task to eliminate violations in the provision of the reduction stage with bottom buckets, leading to a decrease in production efficiency, is given. To study the possibility of solving the problem, a software library of simulation and multi-agent modeling is developed. A model of sponge production is created with the library. The model is equipped with measurements on location, the statistical distributions is assumed to be uniform due to insufficient data. A study of the influence of a number of controllable factors on the performance of the plots, the waiting time of bottom buckets in the queue for magnesium chloride discharge and the percentage of violations in the provision of the restoration site with bottom buckets is made with the software model. According to the results of the first part of the research, most of the factors were discarded as insignificant regarding to their influence on the result. Further, the joint influence of such factors as the number of bottom buckets, the discharge time of magnesium chloride from the titanium sponge recovery apparatus, and the transport time of the bottom bucket to the magnesium electrolysis section is investigated. It is found out that a joint impact of factors produces a synergistic effect which significantly exceeds the model's response to independent changes. In the first approximation, limits of the factors to provide process violations exception are determined. It is shown that the refinement of statistical distributions can significantly affect to the simulation results. As a conclusion the qualitative results of the study can be considered ade-

quate, but to clarify the quantitative results, more measurements and more accurate statistical distributions of random variables are needed.

*Keywords:* sponge titanium production, queuing model, numerical experiment, optimization, control.

### References

1. Nechayev V.N., Tsaplin A.I. [Mathematical Modeling of the Process of Heating the Reduction Reactor in Magnetermic Production of Spongy Titanium]. *Journal of Perm State Technical University. Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, no. 9, pp. 166–176. (in Russ.)
2. Fang Z.Z., Paramore J.D., Sun P., Chandran K.S.R., Zhang Y., Xia Y., Cao F., Koopman M., Free M. Powder Metallurgy of Titanium – Past, Present and Future. *International Materials Reviews*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 407–459. DOI: 10.1080/09506608.2017.1366003
3. Jie Chen Mu, Xu Dong Zhang, Li Peng Zhang. Direct Electrochemical Reduction of Solid TiO<sub>2</sub> in [BMIM]BF<sub>4</sub>-CaCl<sub>2</sub> Ionic Liquid. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 492, pp. 248–252. Available at: www.scientific.net/AMM.492.248. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.492.248
4. Garmata V.A., Petrun'ko A.N., Galitskiy N.V., et al. *Titan* [Titan]. Moscow, Metallurgy Publ., 1983. 559 p.
5. 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. DOI: 10.1007/s40092-015-0115-9
6. Mourtzis D., Doukas M., Bernidaki D. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 25, pp. 213–229. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.032
7. Zatonskiy A.V. *Programmnyye sredstva global'noy optimizatsii sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Software Tools for Global Optimization of Automatic Control Systems]. Moscow, Infra-M: ITS RIOR Publ., 2013. 136 p.
8. Suleev D.K. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tekhnologicheskimi protsessami titanovogo proizvodstva* [Automated Process Control System for Titanium Production]. Alma-Ata, Gylym Publ., 1991. 84 p.
9. Nasyrov Ya.A. [Experience in Using MATLAB and ANYLOGIC to Develop Decision Support Systems for Production Planning]. *Sed'maya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika": tr. konf.: v 2 t.* [Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference "Simulation Modeling. Theory and Practice": Works of the Conference in 2 Volumes]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2015, pp. 236–239.
10. Zatonsky A.V., Ufimtseva V.N. [Development of Object Tools for Simulation and Multiagent Modeling of Production Processes]. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing and Computer Science*, 2018, no. 4, pp. 56–62. (in Russ.) DOI:10.24143/2072-9502-2018-4-56-62
11. Shikhareva T.I., Lekomtsev A.E. [Process Analysis at Reduction and Separation Sites in Titanium Production]. *Solution*, 2017, vol. 1, pp. 340–342. (in Russ.)
12. Zatonsky A.V., Varlamova S.A., Kolchev A.V., Myasnikov A.A. [Use of Videographic Information to Clarify Dynamic Stochastic Model of Potassium Ore Flotation Process]. *Internet Magazine "Knowledge"*, 2017, no. 2 (39), pp. 87. (in Russ.)
13. Boev V.D. *Issledovanie adekvatnosti GPSS WORLD i Any Logic pri modelirovanii diskretno-sobytiynykh protsessov* [Research of Adequacy of GPSS WORLD and Any Logic in Simulation of Discrete-Event Processes]. St. Petersburg, VAS Publ., 2011. 404 p.

Received 10 August 2019

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Затонский, А.В. Модельное исследование совместной работы участков производства губчатого титана / А.В. Затонский, В.Н. Уфимцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 116–123. DOI: 10.14529/ctcr190411

### FOR CITATION

Zatonskiy A.V., Ufimtseva V.N. Research of Joint Work of Titanium Sponge Plots by a Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 116–123. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190411