УДК 669.713.728 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-136-141

О качестве алюминия-сырца для производства алюминиевой катанки

А.А. Терентьев[1 a], С.И. Ножко[2 b]

[1]Сибирский федеральный университет, ул. Киренского 26а, Красноярск, Россия
[2]ООО «РУСАЛ – Инженерно-технологический центр», ул. Пограничников 37, Красноярск, Россия
[a]AndreyTerentiev@rusal.com,[b]Semen.nozhko@rusal.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-9229-0820, [b]https://orcid.org/0000-0001-7437-5145
Статья поступила 16.01.2018, принята 3.02.2018

В последние годы основным вектором развития алюминиевых заводов стало увеличение объемов производства продукции с добавленной стоимостью — сплавов и алюминиевой катанки. Для успешного производства алюминиевой катанки необходимо, чтобы содержание железа в электролитическом алюминии для обеспечения качественной расшихтовки было как минимум на 0,01 % ниже, чем требуется потребителям. При более существенном увеличении средневзвешенного содержания железа в алюминии-сырце в существующих технологических условиях, при неизменной номенклатуре товарной продукции, в литейном отделении начинается накопление металла средних и низших сортов по причине невозможности поддержания необходимого содержания железа в товарном металле, растет также риск необеспечения качества производимой продукции. Это экономически и технологически нецелесообразно. В статье представлены результаты регрессионного анализа, в рамках которого определена зависимость содержания железа в производимом алюминии-сырце от содержания серы в анодной массе. Проведен аналитический обзор экспериментов, направленных на снижение коррозии конструкций основного технологического оборудования, разработана методика планирования качества алюминия-сырца, даны практические рекомендации по ее использованию.

Ключевые слова: алюминиевая катанка; качество алюминия; содержание железа в алюминии; управление качеством; электролиз алюминия.

About the quality of raw aluminum for the production of aluminum wire rod

A.A. Terentiev[1 a], S.I. Nozhko[2 b]

[1]Siberian Federal University; 26, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk, Russia
[2]"RUSAL - Engineering and Technology Center" Ltd; 37, Pogranichnikov St., Building #1, Krasnoyarsk, Russia
[a]AndreyTerentiev@rusal.com,[b]Semen.nozhko@rusal.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-9229-0820, [b]https://orcid.org/0000-0001-7437-5145
Received 16.01.2018, accepted 3.02.2018

In recent years, the development of aluminum plants has been aimed at the increase in the volume of products with added value - alloys and aluminum rod. For the successful production of aluminum, it is necessary that the iron content of the electrolytic aluminum in order to ensure quality distribution is at least 0.01% lower than that required by consumers. With a more substantial increase in the average weighted iron content in raw aluminum under the existing technological conditions, with the same nomenclature of marketable products, in the foundry there is an accumulation of medium and lower grades of metal because of the impossibility of maintaining the necessary iron content in the commodity metal. Moreover, it is difficult to ensure the quality of products. It is economically and technologically impractical. The article presents the results of regression analysis, within the framework of which the dependence of the iron content in the produced raw aluminum on the sulfur content in the anode mass is determined. An analytical review of experiments aimed at reducing corrosion of the main technological equipment has been carried out. The technique for planning the quality of raw aluminum has been developed. Practical recommendations for its use have been given.

Key words: aluminum rod; quality of aluminum; content of iron in aluminum; quality control; electrolysis of aluminum.

Введение

Элементом, определяющим качество алюминия-сырца, является железо. Ранее содержание железа в электролитическом алюминии-сырце зависело от объема и своевременности капитального ремонта оборудования, и это положение в целом устраивало потребителя — литейно-прокатное отделение. Ситуация изменилась в 2005–2006 гг., когда увеличилось вовлечение высокосернистых коксов. Увеличение доли высокосернистых коксов серьезно повысило содержание железа в электролитическом алюминии, в первую очередь из-за коррозии секций газосборного колокола и токоподводящих анодных штырей [1–11].

В последние годы основным вектором развития алюминиевых заводов стало увеличение объемов производства продукции с добавленной стоимостью — сплавов и алюминиевой катанки [12, 13]. Для успешного производства алюминиевой катанки необходимо, чтобы содержание железа в электролитическом алюминии для обеспечения качественной расшихтовки было как минимум на 0,01 % ниже, чем требуется потребителям. При более существенном увеличении средневзвешенного содержания железа в алюминии-сырце в существующих технологических условиях, при неизменной номенклатуре товарной продукции, в литейном отделении начинается накопление металла средних и низших сортов по причине невозможности поддержания необходимого содержания железа в товарном металле. Растет также риск необеспечения качества производимой продукции, что экономически и технологически нецелесообразно.

Аналитический эксперимент. Сложившаяся ситуация стала причиной проведения аналитической работы по определению влияния параметров сырья для обеспечения необходимого качества производимой катанки [14–18]. Методом многофакторного регрессионного анализа была получена зависимость содержания железа в производимом сырце от содержания серы в анодной массе (на рисунке 1).

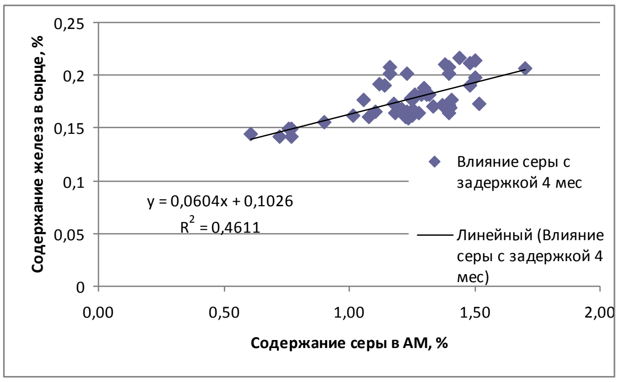

Рис. 1. Влияние содержания серы в анодной массе на содержание железа в сырце

Как видно на рисунке, содержание железа в сырце коррелирует с содержанием серы в анодной массе с 4-месячной задержкой после загрузки анодной массы в электролизеры. Это логично объясняется временным промежутком между загрузкой анодной массы в анод электролизера и ее выходом на подошву анода.

Также анализ производственных данных позволил вывести эмпирическую формулу зависимости количества электролизеров, выдающих металл высших сортов, от средневзвешенного содержания серы в анодной массе (1):

$$\begin{aligned} NBC = 100 * (N + (18\,040*(0{,}19 - \\ - 112/160 * CFe2O3\ Al2O3 * qAl2O3 - \\ - CFe\ AM * qAM - 0{,}1/P1 - 0{,}01 - \\ - 0{,}0604 * CSAM - 0{,}0506))) / Ncp, \end{aligned} \quad (1)$$

где NBC — количество электролизеров, производящих алюминий-сырец высших сортов, *%*; N — базовое количество электролизеров высших сортов, *шт.*; 18 040 — переводный коэффициент, показывающий влияние изменения прихода железа на количество электролизеров высших сортов, *шт./%Fe*; 0,19 — базовое содержание железа в электролизерах высших сортов, *%*; 112/160 — стехиометрический коэффициент перевода содержания оксида железа в глиноземе на содержание чистого железа; CFe2O3 Al2O3 — средневзвешенное содержание оксида железа в перерабатываемом глиноземе (включая сметки и вторичный глинозем), *%*; qAl2O3 — расход глинозема на производство алюминия, *т/т*; CFe AM — средневзвешенное физическое содержание железа в используемой анодной массе, *%*; qAM — расход анодной массы на производство алюминия, *т/т*; 0,1 — коэффициент, учитывающий влияние коррозии технологического инструмента на содержание железа в производимом алюминии-сырце; P1 — средняя периодичность технологических обработок электролизеров, *дней*; 0,01 — поправка на наличие систем АПГ, *%*; 0,0604 — коэффициент, учитывающий влияние содержания серы в анодной массе (коррозия секций ГСК и анодных штырей); CSAM — содержание серы в анодной массе, *%*; 0,0506 — поправка на оплавление фланцевого листа; Ncp — среднее количество работающих электролизеров.

Формула (1) свидетельствует, что увеличение содержания серы в анодной массе на 0,1 % приводит к увеличению содержания железа в электролитическом алюминии-сырце приблизительно на 0,006 %.

Обзор экспериментов, направленных на снижение влияния серы на коррозию анодных штырей. При изучении механизма коррозии штырей в самообжигающихся анодах было установлено, что продуктом коррозии является сульфид железа FeS, образующийся при взаимодействии железа с газообразным COS.

Для определения фактической скорости коррозии анодных штырей и недопущения критической геометрии анодного штыря на ПАО «РУСАЛ Братск» был организован мониторинг состояния парка анодных штырей. Состояние парка определялось ежеквартально путем взвешивания. Взвешивание как характеристика эксплуатационных свойств анодных штырей было выбрано как наиболее технологически простой и приемлемый вариант: прямое измерение геометрии анодного штыря — более сложный и трудоемкий процесс, предполагающий, к тому же, достаточно высокий уровень квалификации персонала. По результатам взвешивания была построена зависимость коррозии анодных штырей от содержания серы в анодной массе и сделан следующий вывод: увеличение содержания серы в анодной массе на 0,1 % увеличивает скорость коррозии на 0,2 кг/мес.

Для подтверждения статистически выявленной зависимости влияния содержания серы на скорость коррозии анодных штырей был проведен лабораторный опыт, заключавшийся в запекании стального стержня в анодной массе с последующей выдержкой при температуре 800 °С в течение 3-х суток [19].

Исследование коррозии стального образца металла в лабораторных условиях проводилось в фарфоровых огнеупорных тиглях. Образцы испытуемого материала предварительно очищали от оксидных пленок. Затем образцы обезжиривались ацетоном и взвешивались на аналитических весах типа АДВ-200 (класс точности измерений массы образцов — 0,2). Подготовленный таким способом образец помещали в тигель и засыпали сверху промышленной анодной массой производства «РУСАЛ Братск». После этого тигли с образцами загружали в печь. Для предотвращения выгорания угольной составляющей анодная масса присыпалась глиноземом (Al2O3). По окончании эксперимента тигли охлаждали в эксикаторе, и по достижении комнатной температуры образцы повторно взвешивали. Фактическая коррозия оценивалась по потере массы исследуемого стального стержня.

Корректность условий проведения опыта оценивалась при сравнении фазового состава окалины, взятой с промышленного анодного штыря, и окалины стального стержня, взятой после проведения опыта. Сопоставимый фазовый состав промышленной (с промышленного анодного штыря) и лабораторной (со стального стержня) окалины показывает правильность разработанной методики (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение фазового состава (распределения серы) промышленной и лабораторной окалины [19]

Окалина	Определяемые компоненты, %		
	S общая	S сульфатная	S сульфидная
С анодного штыря	15,8	0,2	15,6
Лабораторная	16,6	0,4	16,2

Для снижения коррозии стальных штырей проводилось много исследований. Условно их можно разделить на несколько направлений [20, 21]:

– снижение коррозии анодных штырей посредством использования высоколегированных сталей либо коррозионно-устойчивых покрытий, изменение геометрии анодных штырей;

– снижение коррозии анодных штырей путем изменения рецептуры приготовления подштыревой анодной массы;

– прямое снижение содержания серы в используемом коксе.

В разные годы компаниями Alcoa, Kaiser Aluminium, Martin Marietta Aluminium, Comalco и департаментом энергетики правительства США проводились исследования, предусматривающие оценку целесообразности использования различных типов сталей, сплавов и полимерных покрытий в целях снижения коррозии. По результатам исследований было выявлено, что анодные штыри из нержавеющей стали наиболее подвержены коррозии вследствие реакции между фтором и хромом, который входит в состав сплавов нержавеющей стали.

Ни один из испытанных видов стали не обеспечил существенное увеличение срока службы анодных штырей по сравнению с широко используемой для их изготовления сталью 3 при значительном росте стоимости. Нанесение защитных покрытий на поверхность анодного штыря также технологически себя не оправдало — ни один из типов полимерных покрытий не выдержал испытаний при температурах, в которых эксплуатируется анод. Работы по оптимизации геометрии привели к положительным результатам в части снижения перепада напряжения в аноде, однако также не позволили качественно изменить срок службы анодных штырей [19].

Исследования с целью оптимизации рецептуры изготовления подштыревой анодной массы производились в 1980-е гг. при поддержке правительства США в лаборатории аэрокосмических материалов в Балтиморе (США, штат Мериленд) и в национальной исследовательской лаборатории в Окридже (США, штат Теннеси). В рамках исследований были получены положительные результаты (существенное увеличение срока службы анодных штырей) при добавлении в подштыревую анодную массу в качестве протектора алюминиевой стружки. Однако данный результат не был тиражирован ввиду экономической нецелесообразности. Изготовление подштыревой анодной массы из низкосернистого кокса также не показало качественного изменения скорости коррозии анодных штырей. Исследователи связывали данный факт с увеличением проницаемости газов в результате более высокой пористости исследуемого малосернистого кокса [19].

Аналитический обзор экспериментов, направленных на снижение влияния серы на коррозию секций газосборного колокола. Как было указано выше, увеличение прихода железа в сырец при росте содержания серы в анодной массе связано с интенсификацией коррозионных процессов анодных штырей и секций газосборного колокола. Следует рассмотреть научные работы, связанные со снижением скорости коррозии секций газосборного колокола (ГСК).

Изначально коррозия секций ГСК происходит несколько по-иному, нежели коррозия анодных штырей (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление химического состава окалин [22]

Окалина	Определяемые компоненты, %			
	F общий	S общая	S сульфатная	S сульфидная
Анодного штыря	–	15,8	0,2	15,6
Секций ГСК	20,6	14,0	14,0	–
Дымовых труб	3,5	8,7	8,7	–

Настолько различный состав промышленных окалин объясняется условиями их образования. Так, окалина анодного штыря образуется в восстановительной атмосфере в присутствии большого избытка углерода анода. Окалина секций ГСК и дымовых труб, напротив, образуется в условиях окислительной атмосферы, в присут ствии достаточно большого количества газообразного фтора. Соответственно, повышение коррозионной стойкости секций ГСК, дымовых труб в сравнении с анодными штырями требует иного подхода [23].

Сопоставление микроскопирования и химического микроанализа свидетельствует, что натрий и фторсодержащие продукты в реакционной зоне отсутствуют, а их соединения не играют никакой роли в процессе коррозии. Одно из наиболее важных наблюдений заключается в том, что в реакционной зоне присутствует сера. Зона, обогащенная серой, имеет толщину около 100–150 мкм, в то время как общая толщина чешуйчатого слоя около 2 мм. Рентгеновские исследования также показывают, что в зоне коррозии присутствуют преимущественно соединения железа и серы. Это означает, что первичная реакция коррозии дает в качестве основного продукта FeS. Сера для образования FeS доставляется через SO2 путем диффузии газа к зоне коррозии через поры в слоях оксидов железа. SO2 является продуктом окисления серы в ходе анодного процесса. Когда SO2 вступает в контакт с оксидами железа, например, с Fe2O3, в период, когда температура ниппеля 325 °С и ниже, он адсорбируется окалиной в присутствии O2:

$$Fe_2O_3 + 3SO_2 + 3/2\ O_2 = Fe_2(SO_4)_3. \quad (2)$$

Парциальное давление PSO2 соли Fe2(SO4)3 ниже 10–10 Па при 200 °С, поэтому Fe2O3 является хорошим сорбентом для SO2 при низких температурах. Даже следы SO2, образующиеся в электролизере, активно сорбируются оксидами железа в присутствии кислорода и соответствующим образом накапливаются. Когда температура поверхности секций достигает 430 °С и более, реакция, указанная выше, начинает протекать в обратном направлении. Поэтому накопленная соль Fe2(SO4)3 будет разрушаться с образованием Fe2O3, O2 и SO2. Образовавшиеся газы O2 и SO2 будут диффундировать в зону реакции, где парциальное давление кислорода и оксида серы низкое.

В узком слое реакционной зоны кислород и оксид серы вступают в реакцию с железом секций газосборного колокола и пояска анодного кожуха по схеме:

$Fe + 1/2\ O_2 = FeO$;

$Fe + SO_2 = FeS + O_2$;

$Fe + 2SO_2 = FeS_2 + 2O_2$.

При этом FeO является неустойчивым соединением и переходит в Fe2O3, дополняя поверхность новыми чешуйками окалины. Сульфиды железа также быстро окисляются до оксидов и переходят в окалину.

Концентрация диоксида серы в удаляемых от электролизеров с самообжигающимся анодом газах колеблется в пределах 100–300 мг/нм^3.

Обследование группы электролизеров показало, что при нормальной работе температура секций газосборного колокола не превышает 500 °С, причем на крайних и торцевых секциях температура несколько ниже, в то время как средние секции подвергаются действию более высоких температур. При прямом контакте секций газосборного колокола с расплавом их температура резко возрастает и достигает 800 °С [24; 25].

Высокая температура вызывает изменение структуры чугуна: феррито-перлитная структура (при литье «в землю») или ледебуритная эвтектика (при литье в кокиль) распадаются, и образуется ферритная структура с пластинчатым графитом. Изменение структуры сопровождается ростом содержания чугуна, изменением его механических свойств и создает благоприятные условия для развития коррозионного процесса в объеме чугуна вдоль графитовых включений. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что быстрый выход из строя газосборных колоколов обусловлен резким снижением механической прочности серого чугуна в результате:

– коррозии в среде анодных газов, распространяющейся вдоль графитовых включений по всему объему чугуна;

– структурных изменений серого чугуна при изменении температурного режима эксплуатации секций;

– коррозии под действием криолито-глиноземного расплава.

Оценка коррозионной стойкости различных чугунов в криолит-глиноземном расплаве проводилась многими исследователями. Исследования в рамках данной работы в целом подтвердили полученные ранее результаты. Их анализ показывает, что лучшей стойкостью в атмосфере отходящих электролизных газов обладает хромистый чугун, содержащий 20–30 % хрома. Скорость коррозии такого чугуна в 5–6 раз меньше, чем у серого чугуна. Низкохромистые чугуны имеют практически такую же коррозионную стойкость, как и серый чугун.

Образцы высокопрочного чугуна оказались несколько более устойчивы по сравнению с серым чугуном, что вполне закономерно и хорошо согласуется с теоретическими представлениями о процессах окисления серых и высокопрочных чугунов. Наличие графита в виде разобщенных сфероидных включений препятствует проникновению окислительного агента вглубь матрицы, и окисление в таком чугуне идет практически только с поверхности, в то время как в сером чугуне, имеющем рассеченную пластинчатым графитом матрицу, процесс окисления захватывает не только поверхность, но и внутреннюю (по графитовым включениям) часть образца.

Ускоренное охлаждение с целью получения перлитной матрицы в высокопрочном чугуне практически не сказывается на стойкости образцов в анодных газах, так как при данных температурах уже после 40 суток испытания структура металлической основы была чисто ферритной [26].

Нестойкими в агрессивной среде анодных газов оказались алюминиевые чугуны, причем менее стойким оказался чугун, содержащий большее количество алюминия. Это, по-видимому, связано с наличием фтора в атмосфере анодных газов, с которыми алюминий может давать соединения.

На высокохромистых чугунах окисел имеет плотноупакованную решетку типа Ме3О4. На алюминиевом чугуне продукты коррозии содержат окислы железа и алюминия.

Металлографический анализ образцов чугуна в исходном состоянии и после испытания в газах электролизера показал, что наиболее значительные структурные изменения произошли в сером и высокопрочном перлитном чугуне.

Чугуны, легированные хромом, обладают более стабильной структурой. В отличие от серого и отбеленного нелегированных чугунов, в низкохромистых чугунах не обнаружено разложение вторичного и первичного цементита. Структуры высокохромистых (20–30 % хрома) чугунов также весьма стабильны. Проникающего внутрь окисления на образцах чугунов, легированных хромом, не обнаружено.

Испытания механических свойств материалов показали, что при температурах 500–700 °C большую кратковременную прочность имеют высокохромистые чугуны и чугуны с шаровидным графитом. За исключением последнего, остальные испытанные материалы при температуре 500 °C имеют примерно одинаковые пластические свойства. У высокопрочного чугуна эти характеристики в несколько раз выше [26].

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

– небольшие добавки хрома, никеля и кремния не могут оказывать существенного влияния на коррозионную стойкость железоуглеродистых сплавов в криолитоглиноземном расплаве;

– добавки алюминия, даже в значительном количестве (до 22 %), также практически не могут влиять на коррозионную стойкость сплавов в исследуемой среде;

– введение в сплав хрома в пределах 20–30 % резко увеличивает его коррозионную стойкость;

– наиболее оптимальным материалом для изготовления секций газосборного колокола следует считать чугуны марок ЖЧХ-30, ВЧ-50, ЖЧХ-1,5.

Проведенные в рамках данной работы экспериментальные испытания секций ГСК, изготовленных из указанных материалов, подтвердили ранее изложенные выводы, а потому углубление исследований было признано нецелесообразным.

Выводы

1. Методом регрессионного анализа данных определена зависимость содержания железа в производимом алюминии-сырце от содержания серы в анодной массе.

2. Проведен аналитический обзор экспериментов, направленных на снижение коррозии анодных штырей и секций газосборного колокола. Показано, что процесс коррозии анодных штырей и секций газосборного колокола изучен достаточно глубоко и потому не нуждается в дополнительном изучении.

3. Организован мониторинг коррозионной убыли веса штыря. Определена фактическая скорость сгорания анодных штырей и ее взаимосвязь с содержанием серы в анодной массе.

4. Определена критическая величина содержания серы в анодной массе, разработана методика планирования качества производимого алюминия-сырца, даны практические рекомендации по ее использованию.

Литература

1. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Perfomance with Blended Coke // Light Metals. 2005. P. 659-663.

2. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Rewiew of Coke and Anode Desulfurization // Light Metals. 2007. P. 895-900.

3. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality// Light Metals. 2009. P. 957-962.

4. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter // Light Metals. 2008. P. 861–864.

5. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global Trends in Anode Grade Coke Availability & Quality for Australasian Aluminium Industry. Proc. 7-th Aust. Al Smelting Workshop. 2001.

6. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Perfomance and Operational Costs-Alba´s Experience // Light Metals. 2010. P. 1011–1014.

7. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption // Light Metals. 1994. P. 659-665.

8. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Con-centrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies // Light Metals. 2009. P. 1007–1011.

9. Половников В.М., Черских И.В., Старцев Е.А. Опыт использования высокосернистых коксов при производстве обожженных анодов // Материалы Второго междунар. конгресса «Цветные металлы-2010». М., 2010. С. 45-49.

10. Косыгин В.К., Богданов Ю.В., Аюшин Б.И., Ершов В.А., Сысоев И.А. Технология анода с применением «сухой» анодной массы на пековом коксе: опытно-промышленные испытания на Иркутском алюминиевом заводе // Электрометаллургия легких металлов: сб. науч. тр., посвящ. 45-летию ОАО "Сибвами". М., 2004. С. 32–37.

11. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: ИД. «Руда и металлы», 2001.

12.Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе /авт.- сост. Б.И. Зельберг, Л.В. Рагозин, А.Г. Баранцев, О.И. Ясевич, В.Г. Григорьев, А.Н. Баранов. СПб.: МАНЭБ, 2013. 676 с.

13. Кузьмин М.П. Исследование и совершенствование процесса кристаллизационного рафинирования технического алюминия: автореф. дис . … канд. техн. наук. Иркутск, 2015.

14. Ножко С.И. К вопросу управления качеством производимого электролитического алюминия // Цветные металлы. 2011. № 6. С. 45–47.

15. Бегунов А.И., Кузьмин М.П. Способ очистки технического алюминия: пат. 2593881. Рос. Федерации; заявл. 08.04.15, опубл. 10.08.16.

16. Бегунов А.И., Кузьмин М.П. Повышение сортности технического алюминия методом фракционной кристаллизации // Актуальные проблемы химии и биотехнологии: материалы I всерос. науч.-практической конф. Иркутск, 2015. С. 9-11.

17. Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю. Ликвация и повышение качества проб литейных алюминиевых сплавов // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 210-213.

18.Begunov A.I., Kuzmin M.P. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminium // Журн. Сиб. Федер. ун-та. Сер. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 2. С. 132-137.

19. Победаш А.С. Повышение эффективности производства алюминия путем увеличения срока службы анодных штырей: дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2009.

20. Бажин В.Ю., Кульчицкий А.А., Кадров Д.Н., Петров П.А. Оптический контроль состояния стальных анодных штырей на электролизерах Содерберга // Металлург. 2016. № 8. С. 12-15.

21. Ножко С.И., Ворона А.Б., Турусов С.Н., Янко Э.А. Повышение эффективности работы алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом и верхним токоподводом посредством дифференцированной расстановки анодных штырей // Цветные металлы. 2010. № 3. С. 62-64.

22. Тимкина Е.В. Исследование и разработка технологии получения фтористых солей из фторуглеродсодержащих материалов при производстве алюминия: автореф. дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2016.

23. Гуляев А.В., Гавриленко Л.В., Баранов А.Н., Ножко С.И. Утилизация твердых углеродсодержащих отходов на алюминиевом заводе, оснащенном электролизерами с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом// Экология и промышленность России. 2017. № 5. С. 8-10.

24. Ножко С.И. Способ определения производительности электролизера для производства алюминия // Изв. высш. учеб. заведений. Цветная металлургия. 2011. № 1. С. 18-21.

25. Баранов А.Н., Гавриленко А.А., Волянский В.В., Гавриленко Л.В., Ножко С.И., Тимкина Е.В. Технология получения фторида кальция из отходов алюминиевого производства // Металлург. 2017. № 6. С. 69-73.

26. Справочник по чугунному литью / авт.-сост. Н.Г. Гришковец. М.: Металлургия, 1978.

References

1. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Perfomance with Blended Coke // Light Metals. 2005. P. 659-663.

2. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Rewiew of Coke and Anode Desulfurization // Light Metals. 2007. P. 895-900.

3. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality // Light Metals. 2009. P. 957-962.

4. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter // Light Metals. 2008. P. 861-864.

5. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global Trends in Anode Grade Coke Availability & Quality for Australasian Aluminium Industry. Proc. 7-th Aust. Al Smelting Workshop. 2001.

6. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Perfomance and Operational Costs-Alba´s Experience // Light Metals. 2010. P. 1011-1014.

7. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption // Light Metals. 1994. P. 659-665.

8. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Concentrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies // Light Metals. 2009. P. 1007-1011.

9. Polovnikov V.M., Cherskikh I.V., Startsev E.A. Experience in the use of high-sulfur cokes in the production of baked anodes // Materialy Vtorogo mezhdunar. kongressa «Tsvetnye metally-2010». M., 2010. P. 45-49.

10. Kosygin V.K., Bogdanov Yu.V., Ayushin B.I., Ershov V.A., Sysoev I.A. Anode technology using "dry" anode mass on pitch coke: pilot-industrial tests at the Irkutsk Aluminum Plant // Elektrometallurgiya legkikh metallov: sb. nauch. tr., posvyashch. 45-letiyu OAO "Sibvami". M., 2004. P. 32-37.

11. Yanko E.A. Anodes of aluminum electrolyzers. M.: ID. «Ruda i metally», 2001.

12. Reference Book of Metallurgist. Production of aluminium and alloys based on it /avt.-sost. B.I. Zel'berg, L.V. Ragozin, A.G. Barantsev, O.I. Yasevich, V.G. Grigor'ev, A.N. Baranov. SPb.: MANEB, 2013. 676 p.

13. Kuz'min M.P. Research and Improvement of the Process of Crystallization Refining of Technical Aluminium: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2015.

14. Nozhko S.I. Quality management of electrolytic aluminum // Non-ferrous Metals. 2011. № 6. P. 45-47.

15. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Method of Cleaning technical Aluminium: pat. 2593881. Ros. Federatsii; zayavl. 08.04.15, opubl. 10.08.16.

16. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Improvement of the Quality of technical Aluminium by fractional Crystallization // Aktual'nye problemy khimii i biotekhnologii: materialy I vseros. nauch.-prakticheskoi konf. Irkutsk, 2015. P. 9-11.

17. Kuz'min M.P., Kuz'mina M.Yu. Segregation and Quality improvement of Samples of foundry Aluminium Alloys // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12 (83). P. 210-213.

18. Begunov A.I., Kuzmin M.P. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminium // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2014. T. 7, № 2. P. 132-137.

19. Pobedash A.S. Increase the Efficiency of Aluminium Production by Increasing the Service Life of the Anode Pins: dis. … kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2009.

20. Bazhin V.Yu., Kul'chitskii A.A., Kadrov D.N., Petrov P.A. Optical Control of the State of Steel Anode Pins on Soderberg Electrolyzers // Metallurg. 2016. № 8. P. 12-15.

21. Nozhko S.I., Vorona A.B., Turusov S.N., Yanko E.A. Increasing the Efficiency of the Aluminium Cell by Differentiating the Anode Pin Arrangement // Non-ferrous Metals. 2010. № 3. P. 62-64.

22. Timkina E.V. Research and Development of Technology for the Production of Fluoride Salts from Fluorocarbon-containing Materials in the Production of Aluminium: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. Irkutsk, 2016.

23. Gulyaev A.V., Gavrilenko L.V., Baranov A.N., Nozhko S.I. Utilization of Solid carbonaceous Waste at an Aluminium Plant // Ekologia i promyshlennost Rossii (Ecology and Industry of Russia). 2017. № 5. P. 8-10.

24. Nozhko S.I. Method for determining the productivity of an electrolytic cell for the production of aluminum // Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities′ Proceedings. Non-ferrous Metallurgy). 2011. № 1. P. 18-21.

25. Baranov A.N., Gavrilenko A.A., Volyanskii V.V., Gavrilenko L.V., Nozhko S.I., Timkina E.V. Technology for Obtaining Calcium Fluoride from Aluminium Waste // Metallurg. 2017. № 6. P. 69-73.

26. Guide to Iron Casting / avt.-sost. N.G. Grishkovets. M.: Metallurgiya, 1978.

УДК 006.91, 681 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-142-147

К построению и реализации оптимальных планов проведения поверок средств измерений с помощью рабочих эталонов

Р.З. Хайруллин[a], К.А. Цыбульникова[b]

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе 26, Москва, Россия
[a]zrk@nm.ru, [b]k.tsybulnikova@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-1214-5069, [b]https://orcid.org/0000-0002-1151-9946
Статья поступила 25.12.2017, принята 30.01.2018

Предлагается научно-методический подход к построению и реализации оптимальных планов проведения поверок образцовых средств измерений, используемых для комплектации технических систем специального назначения. Основу подхода составляют математическая модель метрологического обслуживания средств измерений в процессе эксплуатации, а также методы построения оптимального плана поверок и последовательности проведения поверок средств измерений. Математическая модель метрологического обслуживания представляется в форме стандартной целочисленной задачи линейного программирования с ограничениями в форме равенств и неравенств. При этом средства измерений объединяются в комплексы по территориальному принципу. С использованием принципа декомпозиции указанная задача представляется в виде совокупности нескольких задач линейного программирования меньшей размерности, количество которых равно количеству комплексов. В работе сформулированы достаточные условия целочисленности оптимального решения задачи линейного программирования. При выполнении этих условий рекомендуется использовать стандартный симплекс-метод, имеющий существенно меньшую трудоемкость по сравнению с методами решения целочисленных задач. После решения совокупности задач линейного программирования строится оценка снизу для затраченного ресурса (времени обслуживания всех комплексов систем управления). После построения оптимального плана строится последовательность применения рабочих эталонов для поверок комплексов средств измерений и производится оценка времени нахождения на обслуживании хотя бы одного средства измерений. В течение этого времени техническая система в целом, в состав которой входят поверяемые средства измерений, становится неработоспособной и не может быть использована по прямому назначению. При построении последовательности применения рабочих эталонов для поверок средств измерений используются стандартные алгоритмы и программные средства решения комбинаторных задач и дискретных задач оптимизации. Представлены результаты решения модельной задачи построения оптимальных планов проведения поверок.

Ключевые слова: планирование поверок средств измерений; задача линейного программирования; рабочие эталоны.

To the construction and implementation of optimal plans for verification of measuring instruments with the help of working standards

R.Z. Khayrullin[a], K.A. Tsybulnikova[b]

Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia
[a]zrk@nm.ru, [b]k.tsybulnikova@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-1214-5069, [b]https://orcid.org/0000-0002-1151-9946
Received 25.12.2017, accepted 30.01.2018

A scientific-methodical approach is proposed for the construction and implementation of optimal plans for conducting tests of exemplary measuring instruments used to complete technical systems for special purposes. The basis of the approach is a mathematical model of metrological maintenance of measuring instruments in the process of exploitation, a method for constructing an optimal plan of checks and a method for constructing a sequence of inspections of measuring instruments. The mathematical model of metrological service is represented in the form of a standard integer linear programming problem with constraints in the form of equalities and inequalities. In this case, the means of measurement are combined into complexes of measuring instruments on a territorial basis. Using the decomposition principle, the indicated problem is represented as a set of several linear programming problems of smaller dimension. The number of linear programming tasks is equal to the number of complexes. In this paper, sufficient conditions for the integer-valuedness of the optimal solution of the linear programming problem are formulated. When these sufficient conditions are met, it is recommended to use the standard simplex method, which is significantly less labor-intensive in comparison with methods for solving integer-valued problems. After solving the totality of linear programming problems, a lower estimate for the expended resource (service time of all control system complexes) is constructed. After the construction of the optimal plan, a sequence of application of working standards for verification of the complexes of measuring instruments is built, and the time of finding at least one measuring instrument *is evaluated. During this time, the technical system as a whole, which includes the verified means of measurement, becomes inoperative and can not be used for its intended purpose. To build a sequence of application of working standards for verification of measuring instruments, standard algorithms and software solutions for combinatorial problems and discrete optimization problems are used. The results of solving the model problem of constructing optimal verification plans are presented.*

Key words: planning of verification of measuring instruments; linear programming problem; work measurement standards.

Введение

Обеспечение корректности передачи раз мера единиц физических величин во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем — нормативных документов, устанавливающих соподчинение средств измерений (СИ), участвующих в передаче размера единицы от эталонов к эталонам, и СИ с указанием методов и погрешности [1–8]. Под передачей единицы физической величины другим эталонам и СИ понимается приведение размера величины, хранимой в СИ, к размеру единицы величины, воспроизводимой эталоном. Эта процедура осуществляется при поверке СИ. При поверках, проводимых на регулярной основе на этапе эксплуатации специальной техники и установленных на них СИ, происходит процесс передачи размера единиц от эталонов более высокого разряда к эталонам низшего разряда и СИ.

В общем виде поверочную схему можно представить в виде пирамиды (рис. 1), в основании которой находится вся совокупность средств измерений одной и той же физической величины, вершину занимает исходный эталон (государственный эталон), а на промежуточных «этажах» расположены рабочие эталоны (РЭ) различных разрядов в соответствии с их точностью [1–3]. Различные аспекты применения измерительной техники и методы, используемые для повышения точности измерений, рассмотрены в [4–10].

Рис. 1. Поверочная схема

В статье предлагается научно-методический подход к построению и реализации оптимальных планов проведения поверок образцовых СИ [12, 13], расположенных в пирамиде между РЭ и рабочими средствами измерений, с помощью РЭ, включающий:

– метод построения оптимального плана поверок (метрологического обслуживания) образцовых СИ и комплексов средств измерений (КСИ),

– метод построения последовательности проведения поверок КСИ.

В качестве критерия оптимальности используется расход ресурса на проведение поверок.

Задача построения оптимального плана поверок формулируется в форме целочисленной задачи линейного программирования (ЗЛП). При этом СИ объединяются в КСИ по территориальному принципу. С использованием принципа декомпозиции задача представляется в виде совокупности нескольких ЗЛП меньшей размерности. Количество ЗЛП равно количеству КСИ. В работе сформулированы достаточные условия целочисленности оптимального решения ЗЛП. При выполнении этих условий для решения ЗЛП предлагается использовать стандартный симплекс-метод. После решения совокупности ЗЛП строится оценка снизу для времени обслуживания всех КСИ.

После построения оптимального плана формируется последовательность применения РЭ для поверок КСИ и производится оценка времени нахождения на обслуживании хотя бы одного СИ. В течение этого времени техническая система в целом, в состав которой входят поверяемые СИ, является неработоспособной и не может быть использована по прямому назначению. Для построения последовательности применения РЭ для поверок СИ используются стандартные алгоритмы и программные средства решения комбинаторных и дискретных задач оптимизации [14–20].

Постановка задачи оптимального использования рабочих эталонов для поверок средств измерений. Рассмотрим R рабочих эталонов, используемых для передачи M различных единиц величин.

Характеристический вектор для r-го РЭ размерности M имеет вид:

$$V_r^0 = \begin{pmatrix} v_{r1}^* \\ v_{r2}^* \\ \dots \\ v_{rM}^* \end{pmatrix}, \; r = 1,2,...,R \; .$$

Координаты характеристического вектора могут равняться нулю или единице. Координаты показывают, какие физические величины могут быть переданы СИ с помощью этого эталона. Например:

$$V_r^0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть задано некоторое множество СИ, описываемое с помощью множества характеристических векторов. Объединим все СИ в J комплексов СИ, например, по территориальному принципу. Если сложить все характеристические векторы, входящие в КСИ, то получим вектор поверяемых величин для данного КСИ:

$$S_j^* = \begin{pmatrix} s_{j1}^* \\ s_{j2}^* \\ \ldots \\ s_{jM}^* \end{pmatrix}, \quad j = 1,2,..., J .$$

Этот вектор, имеющий целочисленные неотрицательные координаты, показывает, какие физические величины и в каком количестве должны быть переданы в процессе обслуживания данного КСИ.

Матрица поверяемых величин имеет вид:

$$S_j^* = \begin{pmatrix} s_{j1}^* & s_{21}^* & \ldots & s_{J1}^* \\ s_{12}^* & s_{22}^* & \ldots & s_{J2}^* \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ s_{1M}^* & s_{2M}^* & \ldots & s_{JM}^* \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что для передачи эталоном с номером r единицы величины с номером j используется некоторый ресурс t_{rj} (в настоящей работе в качестве ресурса выбрана продолжительность поверки). Тогда матрица удельных затрат ресурсов имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \ldots & t_{1J} \\ t_{21} & t_{22} & \ldots & t_{2J} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ t_{R1} & t_{R2} & \ldots & t_{RJ} \end{pmatrix}.$$

Введем неизвестные величины: x_{rj} — количество единиц физических величин с порядковым номером j, передаваемых r-м эталоном. Тогда искомая матрица обслуживания имеет вид:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \ldots & x_{1J} \\ x_{21} & x_{22} & \ldots & x_{2J} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ x_{R1} & x_{R2} & \ldots & x_{RJ} \end{pmatrix}.$$

Сформулируем задачу оптимального распределения РЭ по множеству КСИ в форме целочисленной ЗЛП.

Требуется так распределить РЭ по КСИ (или наоборот КСИ по РЭ), чтобы некоторый линейный критерий качества, зависящий от распределения РЭ по КСИ и ресурса, принимал наименьшее значение:

$$L(X,T) = \sum_{j=1}^{J} x_{rj} t_{rj} \to \min \qquad (1)$$

при условии гарантированного проведения всех необходимых поверок СИ:

$$\sum_{r=1}^{R} x_{rm} v_{rj}^* \ge s_{jm}^*,$$

$$m = 1,2,..., M, \quad j = 1,2,..., J . \qquad (2)$$

После решения (1), (2) и нахождения матрицы X строится технологическая матрица TEX путем поэлементного перемножения элементов матриц T и X:

$$TEX = T \otimes X .$$

Технологическая матрица показывает количество ресурсов, израсходованных на каждую операцию (передачу r-м эталоном j-й физической величины в количестве x_{rj} раз).

Затем проводится оценка суммарного ресурса, израсходованного r-м РЭ (сумма элементов r-й строки матрицы). Отметим, что если в качестве ресурса выбрать время обслуживания, то в течение этого времени РЭ уже занят обслуживанием и не может быть использован для передачи единиц величин другим КСИ.

Производится расчет ресурса, затраченного на поверку j-го КСИ (сумма элементов j-го столбца матрицы).

Отметим, что при решении ряда практических задач система ограничений (2) может быть представлена в виде симплекс-формы с единичными коэффициентами при неизвестных. В этом случае решение соответствующей ЗЛП будет целочисленным. Указанное обстоятельство позволяет применять для решения целочисленной ЗЛП стандартный симплекс-метод, который имеет существенно меньшую трудоемкость по сравнению с общими методами решения целочисленной ЗЛП [14, 20].

Отметим также, что задача построения последовательности использования РЭ для поверок СИ является NP — полной (труднорешаемой) задачей [14, 20]. Для решения этой задачи в настоящее время существуют достаточно эффективные приближенные методы и программные средства, описанные, например, в [21, 22].

Результаты апробации. Реальный парк СИ включает сотни тысяч образцов СИ, десятки КСИ и десятки тысяч РЭ. ЗЛП такой размерности и соответствующие задачи построения последовательностей проведения поверок решаются с помощью [14, 22]. В статье для наглядности приведены результаты решения модельной задачи: $R = 4$, $M = 4$, $J = 3$. Характеристические векторы для РЭ:

$$V_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \; V_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \; V_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \; V_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

характеристические векторы поверяемых величин для СИ, входящих в первый КСИ:

$$S_{11} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \; S_{12} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \; S_{13} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \; S_{14} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

для СИ, входящих во второй КСИ:

$$S_{21}=\begin{pmatrix}0\\0\\1\\1\end{pmatrix},\ S_{22}=\begin{pmatrix}0\\1\\0\\1\end{pmatrix},\ S_{23}=\begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\end{pmatrix},$$

для СИ, входящих в третий КСИ:

$$S_{31}=\begin{pmatrix}1\\0\\1\\0\end{pmatrix},\ S_{32}=\begin{pmatrix}1\\0\\0\\1\end{pmatrix},\ S_{33}=\begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix},$$

$$S_{34}=\begin{pmatrix}0\\1\\1\\0\end{pmatrix},\ S_{35}=\begin{pmatrix}0\\0\\1\\0\end{pmatrix},\ S_{36}=\begin{pmatrix}0\\0\\1\\1\end{pmatrix}.$$

Тогда вычисленные векторы поверяемых величин для трех КСИ:

$$S_1=\begin{pmatrix}3\\2\\1\\0\end{pmatrix},\ S_2=\begin{pmatrix}0\\1\\1\\3\end{pmatrix},\ S_3=\begin{pmatrix}3\\1\\4\\2\end{pmatrix}.$$

Векторы S_1, S_2, S_3 представим в виде матрицы поверяемых величин:

$$S=\begin{pmatrix}3&0&3\\2&1&1\\1&1&4\\0&3&2\end{pmatrix}.$$

Матрица удельных затрат и матрица затрат ресурсов (времени) на поверку имеют вид:

$$T=\begin{pmatrix}2&1&1\\3&2&2\\3&2&1\\4&3&4\end{pmatrix},\quad Z=T\otimes S=\begin{pmatrix}6&0&3\\6&2&2\\3&2&4\\0&9&8\end{pmatrix}.$$

Введем неизвестные величины: x_{rj} — количество физических величин с порядковым номером j, передаваемых r-м эталоном. Тогда искомая матрица обслуживания имеет размерность 4 x 3.

Решение задачи об оптимальном проведении поверок СИ с помощью РЭ состоит их трех этапов:

1. Решается задача о минимуме суммарного времени поверок всех КСИ при условии, что РЭ в каждый момент времени может обслуживать только одно КСИ (одновременное обслуживание нескольких КСИ невозможно).

2. Строится оценка снизу для времени обслуживания всех СИ.

3. Строится последовательность проведения поверок СИ для каждого рабочего эталона. Рассчитывается время обслуживания трех КСИ в целом (минимально возможное время, в течение которого хотя бы одно СИ находится на обслуживании).

Требуется найти минимум суммарного времени обслуживания всех КСИ:

$$L_1=6x_{11}+6x_{21}+3x_{31}+2x_{22}+2x_{32}+$$
$$+9x_{42}+3x_{13}+2x_{23}+4x_{33}+8x_{43}\to\min$$

при условии обеспечения гарантированных поверок всех трех КСИ:

$$\begin{cases}x_{11}+x_{31}+x_{41}\ge 3\\x_{11}+x_{21}\ge 2\\x_{31}\ge 1\\x_{21}+x_{41}\ge 0\end{cases},\quad \begin{cases}x_{12}+x_{32}+x_{42}\ge 0\\x_{12}+x_{22}\ge 1\\x_{32}\ge 1\\x_{22}+x_{42}\ge 3\end{cases},$$

$$\begin{cases}x_{13}+x_{33}+x_{43}\ge 3\\x_{13}+x_{23}\ge 1\\x_{33}\ge 4\\x_{23}+x_{43}\ge 2\end{cases}.$$

Поскольку матрица ЗЛП имеет блочную структуру, то, используя принцип декомпозиции, будем решать три независимых задачи о минимуме времени поверки для каждого КСИ.

Сформулируем каждую из трех ЗЛП.

1. Требуется организовать поверки всех СИ так, чтобы время поверки 1-го КСИ было минимальным:

$$\begin{cases}L_1=6x_{11}+6x_{21}+3x_{31}\to\min\\x_{11}+x_{31}+x_{41}\ge 3\\x_{11}+x_{21}\ge 2\\x_{31}\ge 1\\x_{21}+x_{41}\ge 0\end{cases}.$$

2. Требуется провести поверки всех СИ так, чтобы время поверки 2-го КСИ было минимальным:

$$\begin{cases}L_2=2x_{22}+2x_{32}+9x_{42}\to\min\\x_{12}+x_{32}+x_{42}\ge 0\\x_{12}+x_{22}\ge 1\\x_{32}\ge 1\\x_{22}+x_{42}\ge 3\end{cases}.$$

3. Требуется провести поверки всех СИ так, чтобы время поверки 3-го КСИ было минимальным:

$$\begin{cases} L_3 = 3x_{13} + 2x_{23} + 4x_{33} + 8x_{43} \to \min \\ x_{13} + x_{33} + x_{43} \ge 3 \\ x_{13} + x_{23} \ge 1 \\ x_{33} \ge 4 \\ x_{23} + x_{43} \ge 2 \end{cases}.$$

Поскольку третья координата для характеристических векторов РЭ равна единице только для 3-го РЭ, то передача размера третьей величины возможна только при использовании 3-го РЭ. При этом третий эталон будет использоваться для передачи величин для 1-го и 2-го КСИ ровно по одному разу, а для 3-го КСИ — ровно четыре раза. Поэтому сразу потребуем $x_{31} = 1$, $x_{32} = 1$, $x_{33} = 4$ и третьи по счету неравенства во всех трех ЗЛП учитывать не будем. В результате решения сформулированных ЗЛП с учетом отмеченных выше условий получим матрицу решений:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 4 \\ 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Технологическая матрица, полученная почленным перемножением матриц T и X, имеет вид:

$$TEX = X \otimes T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 12 & 2 & 2 \\ 3 & 2 & 16 \\ 0 & 18 & 8 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, время обслуживания трех КСИ: $L_1 = 15$, $L_2 = 22$, $L_3 = 26$ соответственно. При этом время загрузки РЭ: $P_1 = 0$, $P_2 = 16$, $P_3 = 21$, $P_4 = 26$. Отметим, что первый эталон не используется совсем, а третий эталон целесообразно использовать только для обслуживания КСИ-2 и КСИ-3.

Оценка снизу для времени обслуживания всех КСИ: $L^- = \max\{L_1, L_2, L_3\} = 26$.

Опишем результаты решения задачи построения последовательности проведения поверок для каждого РЭ. Отметим, что такая последовательность может быть построена не единственным образом [14, 20]. Один из вариантов последовательности представлен на рис. 1.

Общее время нахождения технической системы на метрологическом обслуживании равно 26. В рассмотренном примере оно совпадает с оценкой снизу L^-. Отметим, что при решении ряда практических задач построения последовательности проведения поверок общее время нахождения системы на обслуживании может значительно превосходить величину L^- [14, 15, 19, 20].

Рис. 1. Построение последовательности использования РЭ для поверок КСИ

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан научно-методический подход к оптимизации процесса проведения поверок СИ с помощью РЭ, основанный на решении серии ЗЛП. Решение ЗЛП позволяет разрабатывать оптимальные планы проведения поверок и строить последовательности проведения поверок, реализующие оптимальные планы.

2. Установлено, что если система ограничений ЗЛП может быть представлена в виде симплекс-формы с единичными по модулю коэффициентами при неизвестных, то решение соответствующей ЗЛП также будет целочисленным. При выполнении указанных условий появляется возможность использовать для решения целочисленной ЗЛП стандартный симплекс-метод, который имеет существенно меньшую трудоемкость по сравнению с общими методами решения целочисленной ЗЛП.

Литература

1. Кузнецов В.А., Исаев Л.К., Шайко И.А. Метрология. М.: Стандартинформ, 2005. 298 с.

2. Берка К. Измерения: понятие, теория, проблемы / под ред. Б. В. Бирюкова. М.: Прогресс, 2007. 320 с.

3. Сычев Е.В., Храменков В.Н., Шкитин А.Д. Основы военной метрологии. М.: Военное изд-во, 1993. 400 с.

4. Бачурин Д.П., Яшин А.В. Аттестация программного обеспечения информационно-измерительных систем, входящих в состав испытательного оборудования // Вестн. Метролога, 2013. № 4. С. 8-12.

5. Орлов В.А., Бывших Д.М., Ярыгин Ю.Н. Автоматизация процессов планирования развития техники радиоэлектронной борьбы // Вооружение и экономика, 2015. № 4 (33). С. 75-83.

6. Дьяков А.Н., Решетников Д.В., Бояршинов С.Н. Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // Вооружение и экономика, 2016. № 3 (36). С. 35-43.

7. Кувик Т.Е., Сафонов А.А., Цыбульникова К.А. Оценка трудоемкости оказания научно-технических услуг в области метрологии на примере экспертизы документации, проводи-

мой с целью выдачи заключений о возможности применения средств измерений для комплектации вооружения и военной техники // Сб. тр. Гл. науч. метролог. центра Минобороны России, 2016. № 39. С. 69-80.

8. Хайруллин Р.З. К разработке математической модели прогнозирования уровня исправности парка измерительной техники // Научное обозрение, 2016. № 22. С. 243-247.

9. Костоглотов А.А., Лазаренко С.В. Метод решения обратных измерительных задач с применением аппарата негладкого анализа // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2009. Т. 7, № 10. С. 38–45.

10. Костоглотов А. А., Лазаренко С. В. Негладкий анализ в задачах обработки измерительной информации // Измерительная техника, 2009. № 2. С. 6–11.

11. Прищепа А.Н., Шулунов А.Н. Современное состояние и проблемы развития отечественного приборостроения // Вестн. Метролога, 2012. № 1. С. 4-7.

12. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1961. 391 с.

13. Bryson A., Ho Y. Applied Optimal Control. Blaisdell Publishing. Walthman. MA. 1969. 481 p.

14. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М.: Мир, 1985. 512 с.

15. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия; Телеком, 2006. 452 с.

16. Myerson R.B. Games theory: analysis of conflict. London: Harvard University Press, 1991. 600 p.

17. Fudenberg D., Tirole J. Game theory. Cambridge: MIT Press, 1995. 579 p.

18. Nisan N., Roughgarden T. Tardos E., Vazirani V. Algorithmic game theory. N.-Y.: Cambridge University Press, 2009. 771 p.

19. Broomhead D.S., Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // Complex Systems, 1988. № 2. P. 23-26.

20. Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing. Wiley, 1993. 548 p.

21. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.

22. Хайруллин Р.З. К оптимизации систем высокой размерности с использование компонентов ПО ILOG // Вестн. МГСУ, 2013. № 8. С. 157-163.

References

1. Kuznetsov V.A., Isaev L.K., Shaiko I.A. Metrology. M.: Standartinform. 2005. 298 p.

2. Berka K. Measurement: concept, theory and problems / pod red. B. V. Biryukova. M.: Progress, 2007. 320 p.

3. Sychev E.B., Khramenkov V.N., Shkitin A.D. Fundamentals of military metrology. M.: Voennoe izd-vo, 1993. 400 p.

4. Bachurin D.P., Yashin A.V. Certification of the software of information-measuring systems comprising test equipment // Vestn. metrologa. 2013. № 4. P. 8-12.

5. Orlov V.A., Byvshikh D.M., Yarygin Yu.N. Automation of processes of planning of development of electronic warfare equipment // Armament and Economics. 2015. № 4 (33). P. 75-83.

6. D'yakov A.N., Reshetnikov D.V., Boyarshinov S.N. Modeling system for the maintenance of a healthy state of complex technical systems // Armament and Economics. 2016. № 3 (36). P. 35-43.

7. Kuvik T.E., Safonov A.A., Tsybul'nikova K.A. Evaluation of the complexity of providing scientific and technical services in the field of metrology, for example, examination of documentation carried out for the purpose of issuing opinions on the possible use of measuring instruments for acquisition of weapons and military equipment // Sb. tr. Gl. nauch. metrolog. tsentra Minoborony Rossii. 2016. № 39. P. 69-80.

8. Khairullin R.Z. To development of a mathematical model for predicting the level of the health Park of measuring equipment // *Science Review*. 2016. № 22. P. 243-247.

9. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Method for solving the inverse measuring tasks with application of nonsmooth analysis // Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2009. T. 7, № 10. P. 38-45.

10. Kostoglotov A. A., Lazarenko S. V. Nonsmooth analysis in problems of processing measurement data // Measurement Techniques. 2009. № 2. P. 6-11.

11. Prishchepa A.N., Shulunov A.N. Current status and problems of development of domestic instrument engineering // Vestn. metrologa. 2012. № 1. P. 4-7.

12. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. Mathematical theory of optimal control. M.: Nauka, 1961. 391 p.

13. Bryson A., Ho Y. Applied Optimal Control. Blaisdell Publishing. Walthman. MA. 1969. 481 p.

14. Papadimitriu Kh., Staiglits K. Combinatorial optimization. Algorithms and complexity. M.: Mir, 1985. 512 p.

15. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy system / per. s pol. I.D. Rudinskogo. M.: Goryachaya liniya; Telekom. 2006. 452 p.

16. Myerson R.B. Games theory: analysis of conflict. London: Harvard University Press, 1991. 600 p.

17. Fudenberg D., Tirole J. Game theory. Cambridge: MIT Press, 1995. 579 p.

18. Nisan N., Roughgarden T. Tardos E., Vazirani V. Algorithmic game theory. N.-Y.: Cambridge University Press, 2009.

19. Broomhead D.S., Lowe D. Multivariable functional interpolation and adaptive networks // Complex Systems. 1988. № 2. P. 23-26.

20. Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing. Wiley, 1993. 548 p.

21. Fedorenko R.P. Approximate solution of optimal control problems. M.: Nauka, 1978. 488 p.

22. Khairullin R.Z. Optimization of high dimensionality systems using ILOG software components // Vestn. MGSU. 2013. № 8. P. 157-163.