

ЭНЕРГЕТИКА  
ENERGETICS

**Дидов В. В., Сергеев В. Д., Халченко М. А.**  
**V. V. Didov, V. D. Sergeev, M. A. Khalchenko**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА  
НА ПАССИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ**

**THE RESEARCH OF THE SYNCHRONOUS MAGNETO-ELECTRIC GENERATOR BASED  
ON PASSIVE MAGNETIC BEARING**

**Дидов Владимир Викторович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры энергетики и автоматизации судов Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; 8(914)665-01-79. E-mail: didov.vv@dvfu.ru.

**Mr. Vladimir V. Didov** – PhD in Engineering, Associate professor, professor of Ship Energy and Automation Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690950, Vladivostok, 8 Suhanova str.; 8(914)665-01-79. E-mail: didov.vv@dvfu.ru.

**Сергеев Виктор Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики и электротехники Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; 8(914)700-59-91. E-mail: sergeev.vd@dvfu.ru.

**Mr. Viktor D. Sergeev** – PhD in Engineering, Associate professor, professor of Electric Power and Electrical Engineering Department, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690950, Vladivostok, 8 Suhanova str.; 8(914)700-59-91. E-mail: sergeev.vd@dvfu.ru.

**Халченко Мария Алексеевна** – студентка 4-го курса Владивостокского государственного университета экономики и сервиса (Россия, Владивосток); 8(914)683-51-38. E-mail: mariakh.07@mail.ru.

**Ms. Maria A. Khalchenko** – 4<sup>th</sup> year student, a Vladivostok State University of Economy and service (Russia, Vladivostok); 8(914)683-51-38. E-mail: mariakh.07@mail.ru.

**Аннотация.** Рассматривается компактный высокоскоростной синхронный генератор с возбуждением от фенеборовых постоянных магнитов, с пассивными радиальными и упорными магнитными подшипниками на частоту вращения 40 000 об/мин. Расчётная длина генератора 464 мм, расчётный диаметр 404 мм. Выполнено исследование магнитных полей индуктора и несущей способности подшипников, а также вентиляции и нагрева генератора методом конечных элементов.

**Summary.** This paper presents the compact, high-speed synchronous generator with excitation by permanent NdFeB magnets, passive radial and thrust magnetic bearings for 40 000 rev/min rotational speed. The generator effective length is 464 mm, nominal diameter is 404 mm. Inductor magnet field, bearing strength and also generator ventilation system and heat were researched using the finite-element method.

**Ключевые слова:** генератор, магнитные поля, магнитные подшипники, несущая способность, вентиляция, нагрев, ЭДС.

**Key words:** generator, magnet field, magnetic bearing, load-bearing capacity, ventilation, heating, emf.

УДК 621.313.84

В соответствии с мировыми тенденциями развития микротурбинных технологий в качестве силовой части электроэнергетической установки разработана оригинальная высокоскоростная синхронная машина с возбуждением от современных постоянных магнитов [8; 9] с предусмотренными в конструкции машины пассивными магнитными подшипниками и страховочными шарикоподшипниками. В качестве приводного двигателя машины в режиме генератора предполагается использовать газотурбинную установку, а пуск последней – с помощью предлагаемой машины в режиме стартера.

Задачи исследования:

- определение концентрации напряжений в каналах магнитов;
- изучение влияния зазора между статором и ротором на технические данные генератора;
- изучение картин магнитных полей и распределения индукции в магнитной цепи генератора при радиальном и тангенциальном намагничивании магнитов;
- разработка конструктивных схем и изучение несущей способности радиальных и упорных магнитных подшипников;
- изучение эффективности предложенной системы вентиляции и нагрева генератора.

### Конструкция генератора

На рис. 1 показаны продольный и поперечный разрезы генератора. Статор содержит пакеты из листовой электротехнической стали марки 3425 толщиной 0,05 мм, между пакетами устроены радиальные вентиляционные каналы. Пакеты опираются на корпус с продольными вентиляционными каналами. В изолированных пазах пакетов расположена двухслойная обмотка, выполненная из высокочастотного обмоточного провода марки ЛЭНП. Под клиньями предусмотрены пазовые вентиляционные каналы.

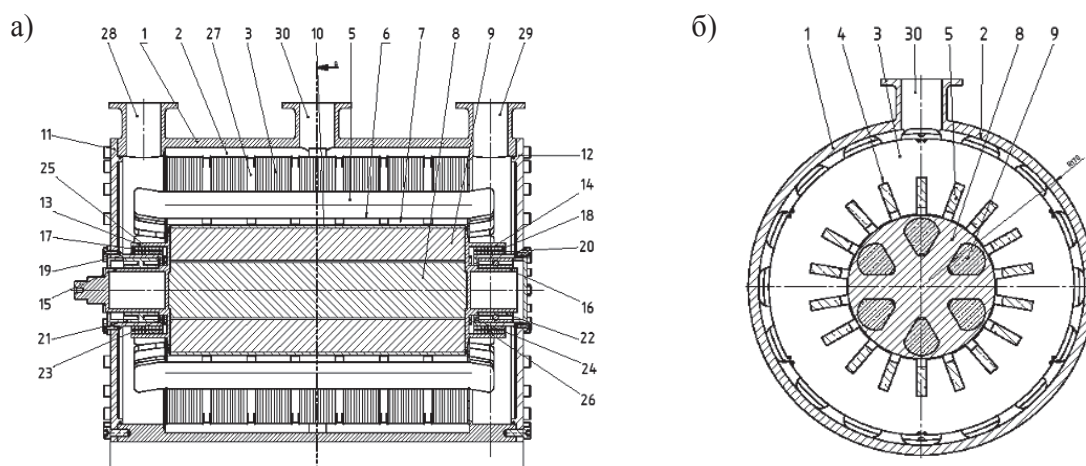


Рис. 1. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы генератора: 1 – корпус генератора; 2 – продольные вентиляционные каналы; 3 – пакеты сердечника статора; 4 – пазы; 5 – катушки обмотки статора; 6 – пазовый клин; 7 – пазовые вентиляционные каналы; 8 – вал; 9 – постоянные магниты индуктора с радиальным намагничиванием; 10 – бандаж ротора; 11, 12 – торцевые щиты генератора; 13, 14 – цапфы ротора со стаканами и 15, 16 – центральными выступами; 17, 18 – наружные и 19, 20 – внутренние кольца постоянных магнитов радиальных магнитных подшипников; 21, 22 – страховочные шарикоподшипники; 23, 24 – наружные и 25, 26 – внутренние кольца упорных магнитных подшипников; 27 – радиальные вентиляционные каналы; 28, 29 – патрубки подачи охлаждённого газа; 30 – патрубков вытяжки нагретого газа из кольцевого канала генератора

Ротор содержит вал из высокопрочного титанового сплава ВТ22 или немагнитной стали. Периферийная часть ротора выполнена как индуктор [10]. В генераторе с радиальным намагничиванием магнитов индуктора магниты располагаются в пазах ротора, не выходящих в зазор. В генераторе с тангенциальным намагничиванием индуктор представляет собой кольцевой пакет, расположенный на валу и составленный из чередующихся в тангенциальном направлении магнитов и полюсов, выполненных из сплава КНФ с высокой магнитной проницаемостью. Снаружи индуктор снабжён тонкостенной немагнитной фиксирующей втулкой. Для обеспечения механической прочности индуктор может быть снабжен бандажом из углеродного волокна. Расчёты показали, что увеличение прочности ротора при наличии бандажа составляет от 5 до 10 % по сравнению с ротором без бандажа.

Генератор снабжён двумя радиальными и двумя упорными пассивными магнитными подшипниками, а также двумя страховочными шарикоподшипниками. Цилиндрические выступы торцевых щитов использованы как обоймы радиальных пассивных магнитных подшипников.

В генераторе предусмотрена вытяжная симметричная радиально-осевая система вентиляции с внешним вентилятором и охладителем газа.

Расчеты прочности ротора, карты магнитных полей генератора и пассивных магнитных подшипников, нагрева и вентиляции выполнены методом конечных элементов.

Для снижения концентрации напряжений участки каналов с магнитами со стороны оси ротора выполнены со скруглением. На рис. 2 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений в роторе с валом, выполненным из титанового сплава, и магнитами из материала неодим-железо-бор. Максимальные эквивалентные напряжения составляют 269,7 МПа. Запас прочности титанового ротора составляет 2,7.

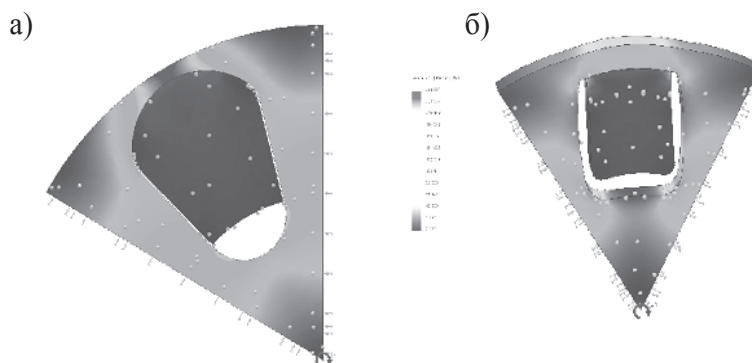


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в роторе:  
а – радиальное и б – тангенциальное намагничивание магнитов

### Электромагнитный расчёт

Электромагнитный расчёт генератора выполнен по методике [11], основанной на литературных сведениях [1 – 7]. Рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок и элементов конструкции взяты из литературы [1 – 5; 7].

Важным параметром генератора является немагнитный зазор  $\delta$  между статором и ротором. Его величина существенно влияет на массогабаритные показатели генератора (см. табл. 1).

Таблица 1

Некоторые расчётные данные генераторов

$\delta$ , мм	1	2	3	4	5	6	7
$B\delta$ , Тл	0,947	0,820	0,726	0,655	0,597	0,549	0,508
$D_{\text{наруж}}$ , м	0,38	0,36	0,345	0,335	0,326	0,320	0,314
$L_{\text{магн}}$ , м	0,30	0,34	0,39	0,44	0,49	0,54	0,60
$M_{\text{маг}}$ , кг	10,7	12,2	14,0	15,7	17,5	19,4	21,4
$M_{\text{медь}}$ , кг	7,6	8,4	9,2	10,0	10,8	11,6	12,4
$M_{\text{полюс}}$ , кг	18,4	20,8	23,9	26,8	30,0	33,2	36,6
$M_{\text{желез}}$ , кг	143	144	146	150	154	159	163
$M_{\text{актив}}$ , кг	179	185	193	203	213	223	234
$\Sigma M$ , кг	270	278	290	304	319	334	350
КПД	0,983	0,983	0,983	0,982	0,982	0,981	0,981

Примечание:  $B\delta$  – рабочая индукция в зазоре;  $D_{\text{наруж}}$  – наружный диаметр статора;  $L_{\text{магн}}$  – осевая длина магнитов;  $M$  – массы магнитов, меди обмотки, полюсов, железа сердечника статора, активных материалов;  $\Sigma M$  – ориентировочная суммарная масса генератора ( $\Sigma M = M_{\text{актив}} \times 1,5$  – с учётом конструктивных элементов)

Выходная мощность 1000 кВт, фазное напряжение 250 В, соединение фаз  $Y$ , ток фазы 1569 А, частота 2 кГц,  $\cos\varphi = 0,85$ , частота вращения ротора 40 000 об/мин, диаметр ротора 0,143 м, линейная скорость на поверхности ротора 300 м/с, число полюсов 6, магниты из материала неодим-железо-бор 35ЕН, намагничивание тангенциальное, сталь 3425, провод ЛЭНП, полюса из сплава 48КНФ, линейная токовая нагрузка  $A = 42\,000$  А/м, плотность тока в обмотки якоря  $ja = 10,66$  А/мм<sup>2</sup>.

### Картины магнитных полей генераторов

На рис. 3 – 6 представлены карты магнитных полей и графики распределения магнитной индукции на поверхности индуктора генераторов при радиальном и тангенциальном намагничивании магнитов индуктора.

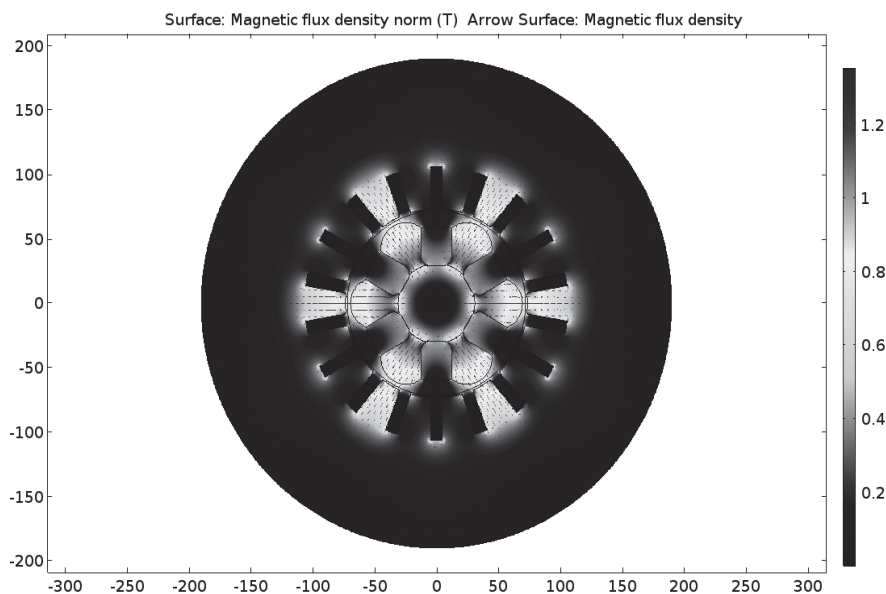


Рис. 3. Карта магнитного поля генератора при радиальном намагничивании индуктора

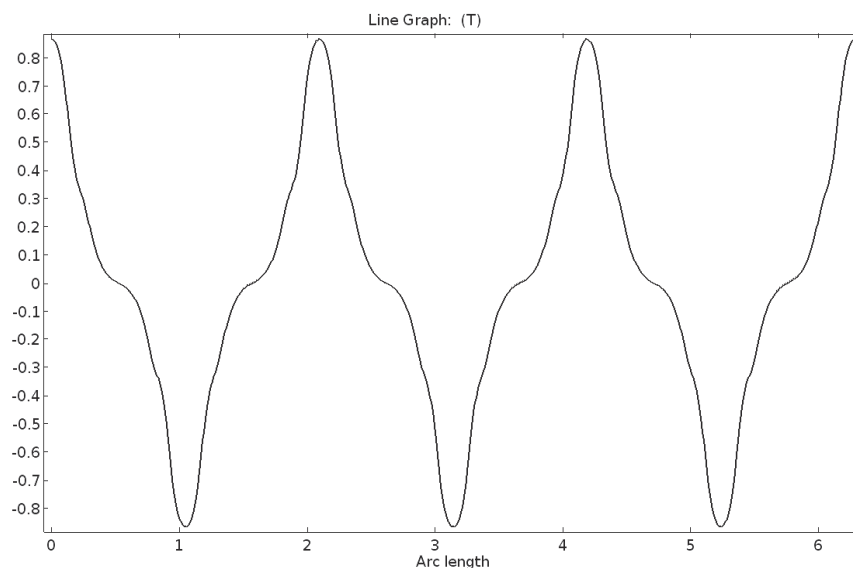


Рис. 4. Распределение магнитной индукции на поверхности индуктора при радиальном намагничивании

Радиус кривизны участков поверхности магнитов индуктора, обращенных к зазору, подбирался с целью обеспечения приближения к синусоидальности графика распределения индукции магнитного поля по окружности поверхности индуктора.

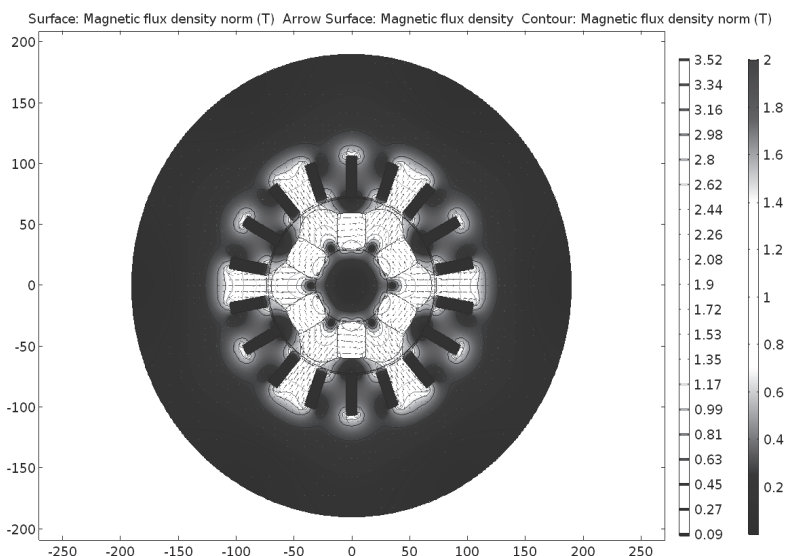


Рис. 5. Карта магнитного поля генератора при тангенциальном намагничивании индуктора

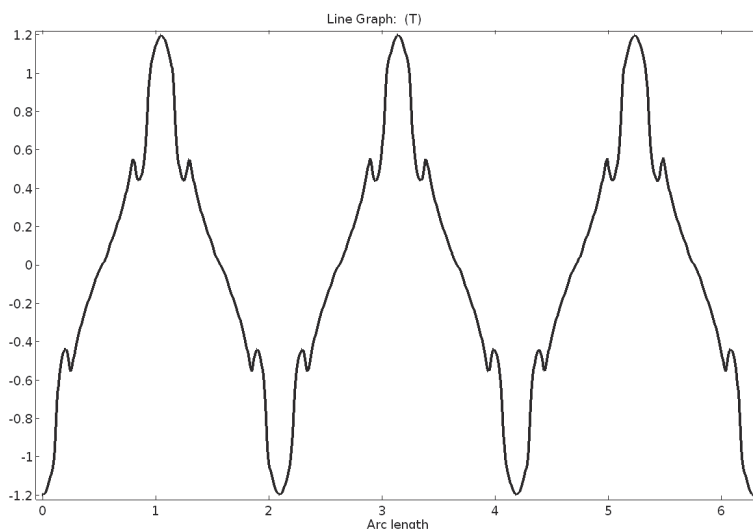


Рис. 6. Распределение магнитной индукции на поверхности индуктора при тангенциальном намагничивании

### Пассивные магнитные подшипники генератора

Радиальные пассивные магнитные подшипники включают цапфы, составленные внутренними поверхностями стаканов 13, 14 (см. рис. 1) на роторе, кольцевые постоянные магниты 17, 18 и опорные поверхности, составленные цилиндрическими выступами торцевых щитов 11, 12, и кольцевые постоянные магниты 19, 20. Стаканы охватывают наружные поверхности кольцевых магнитов 17, 18, что обеспечивает прочность цапфы подшипников. Часть магнитных колец на выступах щитов выполнена на половине дуги окружности, остальные представляют собой полные кольца. Количество колец с неполной дугой рассчитывается так, чтобы обеспечить нулевой эксцентриситет на каждом подшипнике, то есть имеют грузоподъемность, равную нагрузке, прихо-

длежащей от веса ротора на один подшипник. Остальная часть магнитных колец имеет полный охват, что позволяет воспринимать динамические нагрузки.

Параметры радиального магнитного подшипника: наружный магнит имеет радиусы 30/33 мм; внутренний магнит 35/38 мм; поперечное сечение магнитов  $3 \times 3$  мм; число магнитов в ряду пять (половинной дуги); намагничивание магнитов по схеме Хальбаха; остаточная индукция магнитов 1,42 Тл; радиальный зазор в подшипнике 2 мм. Суммарная несущая способность двух подшипников составляет 480 Н. Для восприятия нагрузки от веса ротора достаточно три магнита в ряду.

Полноохватные радиальные магнитные подшипники имеют такие же размеры, и число магнитов в ряду равно пяти. На рис. 7 представлена несущая способность полноохватного радиального подшипника в зависимости от эксцентриситета, а на рис. 8 – подшипника, расположенного только на верхней половине дуги окружности.

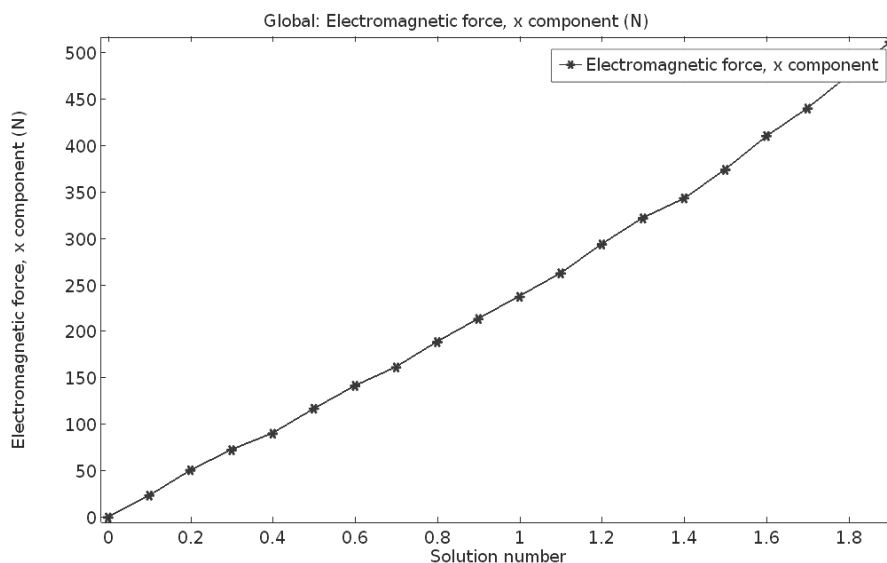


Рис. 7. Зависимость несущей способности радиального пассивного магнитного подшипника от эксцентриситета

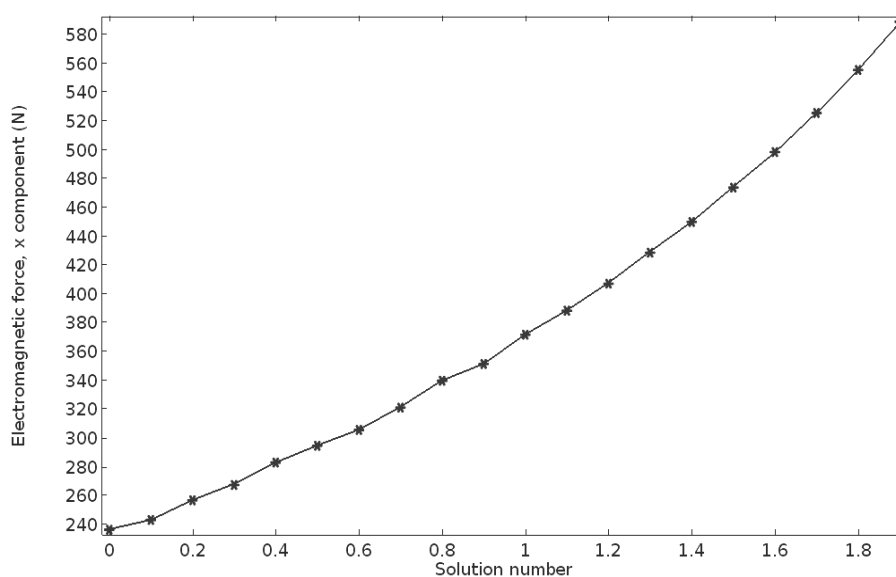


Рис. 8. Зависимость несущей способности половинного радиального пассивного магнитного подшипника от эксцентриситета

Вес ротора генератора с радиальным намагничиванием составляет 33,13 кг. Суммарная несущая способность двух половинных радиальных подшипников превышает весовую нагрузку (ротора) в 1,45 раза.

Упорные пассивные магнитные подшипники содержат наружные кольца 23, 24 на торцевых щитах статора и внутренние кольца 25, 26 на цапфах ротора (см. рис. 1). Кольца упорного магнитного подшипника имеют радиусы 26/36 мм и поперечное сечение магнитов  $2 \times 2$  мм; число магнитов в ряду три; магниты намагничены по схеме Хальбаха; остаточная индукция 1,42 Тл. На рис. 9 показана зависимость несущей способности упорного пассивного подшипника от осевого зазора. Так как в генераторе отсутствуют статические осевые нагрузки, то упорный подшипник необходим для предотвращения осевого смещения ротора при динамических нагрузках и имеет несущую способность 900 Н при зазоре 0,5 мм.

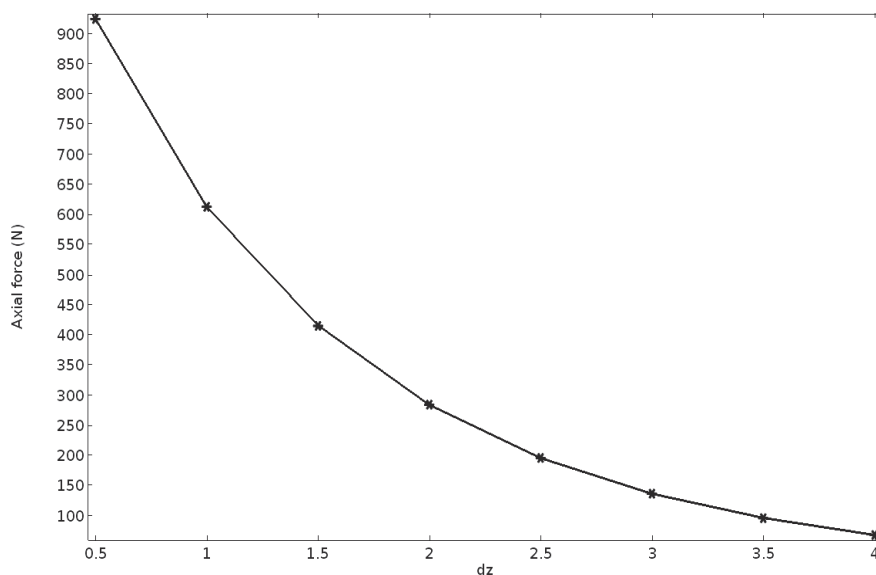


Рис. 9. Зависимость несущей способности упорного пассивного магнитного подшипника от осевого зазора между пятой и подпятником

В случае значительного превышения статических и динамических нагрузок на радиальные и упорные пассивные магнитные подшипники предусмотрены страховочные шарикоподшипники, которые воспринимают нагрузки, когда выбирается зазор между центральными выступами цапф ротора и шарикоподшипниками.

### Вентиляция и нагрев генератора

Полость корпуса генератора выполнена с возможностью подвода в нее охлаждающего газа и отвода последнего после нагрева в электромашине, для чего предусмотрены продольные каналы 2 в корпусе, радиальные вентиляционные каналы 27, выполненные между пакетами сердечника статора, и пазовые каналы 7 (см. рис. 1). Вентиляционные каналы 2, 7, 27 аэродинамически сообщены друг с другом и с патрубками 28, 29 подачи охлаждённого воздуха, и патрубком 30 вытяжки нагретого воздуха из кольцевого сборного канала генератора.

Из охладителя воздух нагнетается внешним вентилятором через патрубки 28, 29 в полость корпуса электромашин в зоны расположения лобовых частей обмотки статора, далее газ распределяется по пазовым 7 и радиальным 27 вентиляционным каналам, затем поступает в продольные вентиляционные каналы 2, уходит по ним в кольцевой канал корпуса генератора и через патрубок 30 удаляется вентилятором в охладитель. Таким образом, обеспечивается независимая симметричная эффективная многоструйная вытяжная радиально-осевая вентиляция обмотки и сердечника статора электромашин.

Для расчета скорости воздуха используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (RANS), дополненные моделью турбулентности. Скорость движения охлаждающего воздуха в каналах генератора показана на рис. 10.

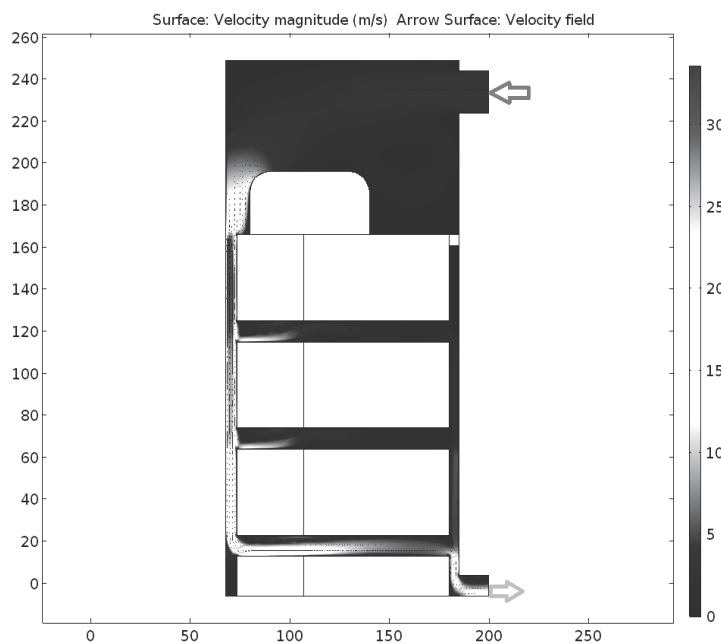


Рис. 10. Распределение скоростей охлаждающего воздуха в каналах генератора

В предлагаемом генераторе температура входного воздуха принята равной 20 °С. Изменение температуры охлаждающего воздуха в тракте охлаждения генератора и пакетах сердечника статора показано на рис. 11.

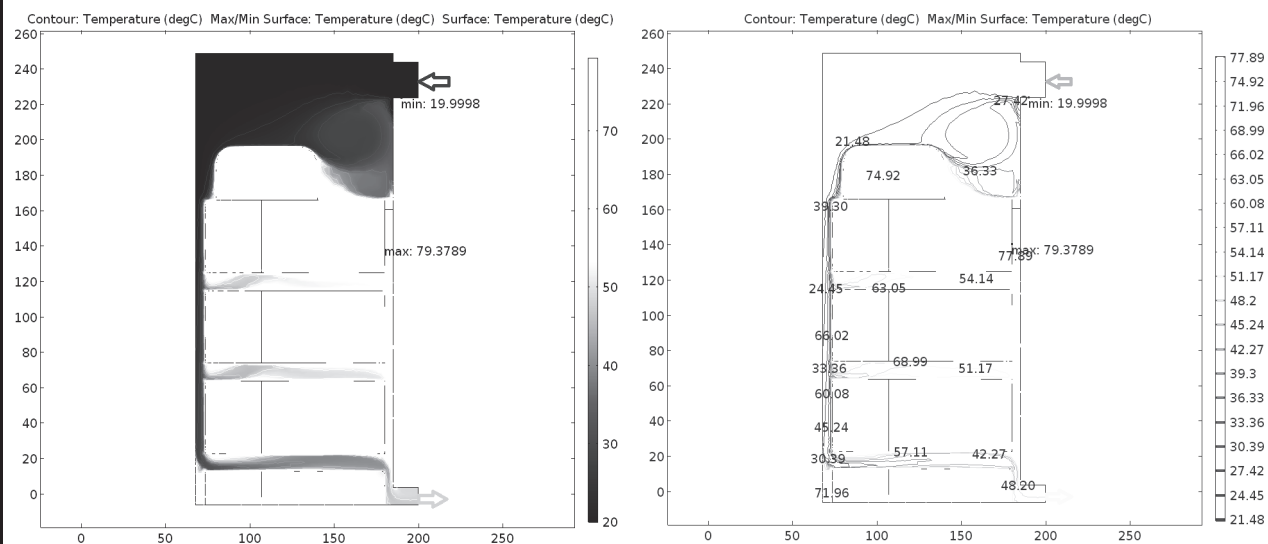


Рис. 11. Температуры охлаждающего воздуха в каналах генератора и пакетах сердечника статора

Для оценки нагрева генератора рассмотрен характерный элемент, состоящий из одного пакета сердечника, и соответствующий ему участок обмотки статора в пазовой части и в радиальном вентиляционном канале (см. рис. 12). В зубцах и ярме пакета выделяются расчётные потери, рав-

номерно распределённые по объёму этих элементов пакета. В проводниках обмотки выделяются потери, соответствующие длине участка обмотки. Изоляция проводников и паза соответствует классу В обмоток статоров машин переменного тока на напряжение до 660 В [7]; пазовый клин выполнен из стеклотекстолита. Стенки пакета и выступающие участки обмотки охлаждаются воздухом, проходящим по радиальным каналам, пазовая часть обмотки и часть зубца охлаждаются воздухом, проходящим в пазовом канале. Теплопередача происходит также между пазовой частью обмотки и соседними зубцами и ярмом, между пакетом и корпусом генератора в месте их контакта и между пакетом и воздухом в осевом канале корпуса.

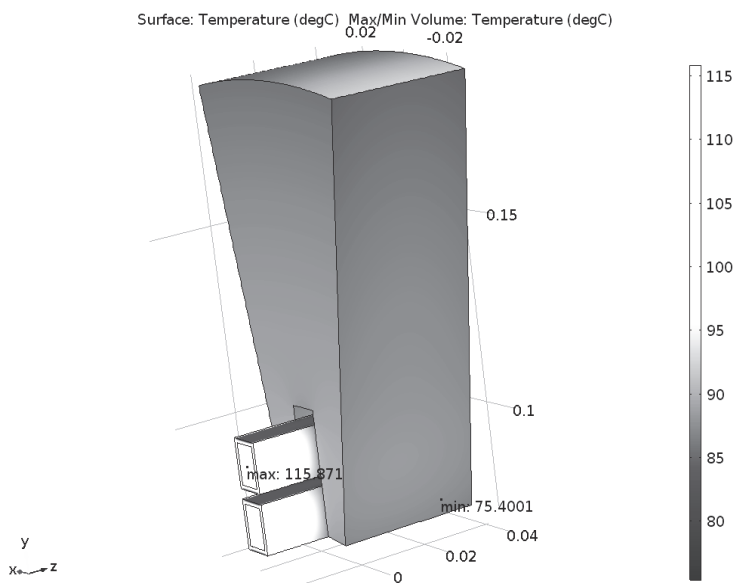


Рис. 12. Элемент генератора при расчёте нагрева

Коэффициенты теплоотдачи с поверхности пакетов в радиальные каналы приняты равными  $45,6 \text{ Вт/С}\cdot\text{м}^2$ , в осевые продольные и пазовые каналы –  $110,6 \text{ Вт/С}\cdot\text{м}^2$ .

## Выводы

1. Разработанные и исследованные пассивные радиальные и упорные магнитные подшипники и страховочные шарикоподшипники могут обеспечить работу генератора в статических и динамических режимах.
2. Карты магнитных полей и графики распределения индукции на поверхности индуктора позволяют наглядно оценить магнитную «загруженность» участков магнитной цепи генератора и корректировать конфигурацию и размеры этих участков.
3. Полученные результаты исследования позволяют выявить температурную напряжённость генератора и оценить эффективность предложенной системы вентиляции.
4. Использование сочетания традиционного метода проектирования и расчёта генератора с моделированием методом конечных элементов позволяет определить основные размеры и обмоточные данные генератора и далее выполнять исследования электромагнитных, температурных и аэродинамических процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 280.
2. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов / В. А. Балагуров. – М.: Высш. шк., 1982. – С. 272.

Дидов В. В., Сергеев В. Д., Халченко М. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПАССИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

3. Балагуров, В. А. Предельная мощность синхронных генераторов с постоянными магнитами / В. А. Балагуров // Электротехника. – 1983. – № 5. – С. 22-24.
4. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов / Д. А. Бут. – М.: Высш. шк., 1990. – С. 416.
5. Вольдек, А. И. Машины переменного тока: учеб. для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2007. – С. 350.
6. Ледовский, А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 169.
7. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. В 2 кн. Кн. 2 / И. П. Копылов, Б. К. Клоков [и др.]; под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – С. 384.
8. Пат. RU 2385523 С1. Электромашинa / В. В. Дидов, В. Д. Сергеев. – № 2009102600/09; заявл. 26.01.09; опубл. 27.03.10. Бюл. № 9.
9. Пат. RU 2385524 С1. Высокооборотная электрическая машина / В. В. Дидов, В. Д. Сергеев, М. М. Халченко, А. П. Левшов. – № 2009102609/09; заявл. 26.01.09; опубл. 27.03.10. Бюл. № 9.
10. Патент RU 2444108 С1. Ротор электромашины / В. В. Дидов, В. Д. Сергеев, Н. С. Телешова – Бюл. № 6.
11. Проектирование и электромагнитный расчёт высокоскоростного магнитоэлектрического синхронного генератора [Электронный ресурс]: учеб. пособие для вузов В. Д. Сергеев, В. В. Дидов [и др.] // Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. – 89 с.



Есин П. А., Иванов С. Н., Шестопадько Д. К.  
P. A. Yesin, S. N. Ivanov, D. K. Shestopalko

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

**EFFECTIVENESS OF USING COMPOSITE MATERIALS IN ELECTRICAL  
INSTALLATIONS**

**Есин Павел Анатольевич** – магистрант кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: e\_sin\_pasha@mail.ru.

**Mr. Pavel A. Yesin** – Master' s Degree Student, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av. 27. E-mail: e\_sin\_pasha@mail.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Sergey N. Ivanov** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27. E-mail: kem@knastu.ru.

**Шестопадько Дмитрий Константинович** – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Dmitry K. Shestopalko** – a student, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av. 27. E-mail: kem@knastu.ru.

**Аннотация.** Показатели эффективности электротехнических установок непосредственно связаны с созданием и использованием новых составных материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Практическое применение композитных материалов является одним из перспективных научно-технических направлений, обеспечивающих повышение эффективности электротехнических установок за счет герметизации токоведущих частей путем их защиты от воздействия внешней среды. Технические характеристики композитного материала соответствуют его структуре и зависят от свойств отдельных компонентов. Проверка соответствия параметров материала реализуется методами компьютерного анализа модели композитного материала в виде структуры, в которой отдельные элементы имеют термодинамические свойства соответствующей фазы состояния. При исследовании топология отдельных элементов в структуре материала задается условными границами раздела в пределах исследуемого композита. Эффективность применения композитных материалов включает повышение класса электробезопасности, увеличение долговечности, снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт, расширение области применения установок.

**Summary.** Indicators of efficiency of electrical installations are directly connected with the creation and use of new composite materials with desired performance properties. Practical application of composite materials is one of promising science and technology areas, providing increase of efficiency of electrical installations due to sealing of the live parts by protecting them from the external environment. Technical characteristics of the composite material correspond to its structure and depend on the properties of the individual components. Checking material parameters is implemented by methods of computer analysis of a model composite material in the form of a structure in which individual elements have the thermodynamic properties of the corresponding phase state. In the study of the topology of separate elements in the structure of the material is defined by conditional boundaries of the section within the studied composite. Efficiency of application of composite materials includes the upgrade of electrical safety, increasing durability, reducing maintenance costs and repair and extension of the scope of installations.

**Ключевые слова:** эффективность применения, электротехнические установки, композитные материалы.

**Key words:** efficiency of application, electrical installation, composite materials.

УДК 621.31:621.25

### **Введение**

В настоящее время вопросы комплексного энергосбережения являются наиболее актуальными для всех промышленно- и аграрноразвитых стран. Экономический анализ эффективности российских энергетических объектов показывает, что на единицу выпускаемой продукции расходуется в среднем в 2...4 раза больше энергоресурсов, чем в других индустриально развитых странах. Производство условной единицы валового внутреннего продукта (ВВП) по данным одного из инициаторов нового научного направления – геотрибоэнергетики – В. Н. Половинкина требует больше нефти на 36 %, а природного газа на 42 % по сравнению с аналогичными показателями в США. Соответственно, решение первоочередной задачи государства – требуемое повышение ВВП – не может быть обеспечено без сокращения энергетических потерь за счет внедрения перспективных ресурсосберегающих технологий и оборудования. При этом важно отметить, что возможность комплексного энергоресурсосбережения в первую очередь связана с минимизацией уровня затрат на его практическую реализацию. По экспертным оценкам затраты на внедрение технологий энергосбережения почти в 4 раза меньше затрат на производство, распределение и транспортирование вырабатываемой энергии к местам потребления. То есть на практике в сложных экономических условиях стоит задача не увеличения новых мощностей, которые оказываются малоэффективными из-за низкого уровня используемых технологий и устаревшего оборудования, а в экономии энергии и повышении энергоэффективности.

Даже самые приближенные исследования показывают, что отечественный потенциал энергосбережения оценивается более чем в пятьсот миллионов тонн условного топлива. Главной причиной текущего состояния является старение основного энергетического оборудования, уровень которого по разным оценкам отстает от зарубежного на 30...40 лет. Причем это приводит не только к прямым производственным затратам, ухудшению качества, снижению объема выпускаемой продукции, но и является причиной техногенных рисков и экологических проблем.

В вопросах энергоэффективности одной из первоочередных областей внедрения энергосберегающих технологий и оборудования являются предприятия машиностроения, металлургические предприятия, предприятия горной промышленности и нефтеперерабатывающие заводы. Акцентирование внимания именно на этих отраслях связано с тем, что они, как правило, являются базовыми предприятиями промышленности. Кроме того, этим отраслям характерны не только максимальное энергопотребление, энергоемкость, но и явно выраженная зависимость себестоимости продукции от роста цен на энергоресурсы.

### **Основные положения и постановка задачи исследования**

Анализ технологических процессов данных производств показывает, что при их реализации используются практически все известные виды преобразования энергии, сопровождающиеся генерацией вторичных энергоресурсов в виде тепловых выделений, избыточных давлений и т.п. Зачастую вторичные энергетические ресурсы составляют если не основную, то, по крайней мере, значительную долю в энергетическом балансе данных производств.

Основой стратегии энергосбережения должен являться энергетический аудит, результатом которого является энергетический паспорт выпускаемой продукции и производства в целом, отражающий все виды потерь и оценку потенциальных возможностей их компенсации. Конкретные ресурсосберегающие технологии зависят от множества факторов и должны разрабатываться применительно к конкретному производству, хотя очевидно, что наиболее перспективные технологии целесообразны для новых производств и предприятий, проходящих плановые ремонты и модернизацию. Для действующих производств более эффективным является последовательное внедрение энергосберегающих технологий и оборудования. Объективно величина совокупных потерь современного предприятия не должна превышать 4...5 %.

Анализ стратегии реализации программ энергосбережения показывает, что в первую очередь преимущественно должны внедряться не требующие крупных капиталовложений технические мероприятия. К таким мероприятиям относится модернизация того оборудования, на долю которого приходится максимальные потери в энергетике, например комплексы для транспортирования тепловой энергии, потери в которых зачастую превышают 50 %. Это подтверждает и сравнение различных энергосберегающих технологий, показывающее, что основное внимание должно быть сосредоточено на проблемах использования всех видов энергии с наименьшими потерями за счет повышения эффективности работы и энергетического совершенства в первую очередь оборудования для генерации, преобразования и транспортирования тепловой энергии.

Снижение потерь в таком оборудовании обеспечивает не только улучшение эксплуатационных характеристик (коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, весогабаритные параметры), но и характеристик, определяемых взаимодействием технических объектов с внешней средой – техноферной безопасности, системной энергоэффективности и совместимости. Анализ эксплуатационных характеристик существующих технических систем позволяет определить наиболее энергоемкие элементы, среди которых устройства для транспортирования и распределения жидких рабочих сред необходимо выделить в первую очередь. Это характерно как для мощных агрегатов теплоэлектростанций, насосных станций, перекачивающих производственных установок промышленных предприятий, в том числе нефтеперерабатывающего и химического комплексов, так и для целого ряда вспомогательного оборудования любого промышленного предприятия.

Развитие энергетического оборудования на данном этапе осуществляется в направлении увеличения удельной мощности агрегатов при одновременном повышении надежности, долговечности и экономичности, а также с повышенными требованиями по безопасности и защите окружающей среды от загрязнения, которые находят отражение в конструкциях новых и модернизации ранее выпускаемых устройств.

Непосредственная связь качества процессов и уровня потерь в энергетическом оборудовании с его техническими характеристиками определяет актуальность разработки новой элементной базы, обеспечивающей повышение энергоэффективности производства в целом. В качестве примера могут быть рассмотрены одни из самых энергозатратных электротехнических установок – насосные установки, единичная мощность которых по самым предварительным данным может достигать 1000 кВт, а коэффициент полезного действия не превышает 60 %. Причиной этого не в последнюю очередь является тот факт, что подавляющее большинство современных насосных установок имеет агрегатную компоновку. В таких установках насос и электродвигатель смонтированы на общей фундаментной плите, а механическая энергия от электродвигателя передается через упругую муфту и приводит в действие исполнительный элемент насоса, таким образом, агрегат включает три отдельных механизма – приводной, передаточный и исполнительный. Недостатки таких устройств очевидны: низкий коэффициент полезного действия вследствие высоких энергетических потерь, недостаточная надежность, низкие весогабаритные характеристики, конструктивная сложность рассматриваемых устройств, ведущая к необходимости их постоянного высококвалифицированного обслуживания, часто связанного с длительным удалением оборудования из производственного процесса для ремонта.

Повышение энергоэффективности оборудования возможно за счет совершенствования отдельных элементов, процессных или системных изменений, выбора программно-аппаратных средств управления, но наиболее существенный результат может быть достигнут при создании принципиально нового оборудования. Очевидное решение задачи повышения эффективности электротехнических устройств на конструктивном уровне привело к техническим решениям, направленным на постепенное объединение привода и исполнительного устройства.

Несмотря на очевидную перспективность научных исследований совмещенных энергетических устройств, вопросы их проектирования ни в зарубежной, ни в отечественной литературе практически не затрагиваются [1]. Основной причиной здесь следует назвать сложность количественной оценки преобразования энергии в таких устройствах, обусловленную необходимостью

одновременного учета мультифизических процессов, являющегося основой инженерных рекомендаций по проектированию и практической реализации высокоэффективных электротехнических устройств. Результаты разработки и исследования, например совмещенных электромеханических преобразователей, имеющиеся в настоящее время, касаются в основном улучшения состояния наиболее нагруженного в тепловом отношении статора и подтверждают перспективность использования специальных электромеханических преобразователей герметичного исполнения. Одним из примеров такой разработки является герметичный электропривод переменного тока компрессорной установки мощностью 20 МВт для транспортировки с большой глубины сопутствующих газов, выпускаемый фирмой Siemens [2]. Эффективность устройства определяется наработкой, составляющей не менее 20 тыс. ч. Следует отметить, что в тяжелых условиях эксплуатации герметичные устройства – это практически единственный реально работоспособный вариант приводного устройства, целесообразность которого обеспечивается высокой надежностью конструкции. Область применения электроприводов переменного тока герметичного исполнения включает как уже упомянутые компрессорные установки, так и технологические центрифуги, перемешивающие устройства, насосы, а также аппараты, которые должны обеспечивать полное отсутствие утечек реагирующих и загрязняющих компонентов в окружающую среду, работу с огнеопасными средами, эксплуатацию при высоких и низких давлениях и температурах.

Повышение энергоэффективности технических систем, использующих герметичное оборудование, также обусловлено возможностью увеличения электромагнитных нагрузок, а соответственно и использования электроприводов, за счет перехода к непосредственному охлаждению их элементов [3].

Практическая реализация таких электротехнических установок связана с разработкой и производством композиционных материалов с заданными физико-химическими характеристиками – одним из перспективных научно-технических направлений, затрагивающих стратегические интересы всех промышленно развитых стран. Повышение эффективности электротехнической установки обеспечивается герметизацией токоведущих частей за счет их капсулирования. Капсулирование состоит в том, что изоляция, например обмотки статора, защищается от воздействия внешней среды посредством литой оболочки из композиционного материала. Это позволяет обеспечить более высокий класс электробезопасности установки; увеличить ресурс; упростить конструкцию, повысить ее структурную надежность, снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт, расширить диапазон эксплуатационных режимов [4].

Технологической основой капсулирования является внедрение специальных процессов, обеспечивающих применение композитных материалов. При этом сам технологический процесс существенно влияет на физико-химические свойства композитов, зависящих от количественного и качественного состава образующих их структуру элементов [5].

Интегральные характеристики композитного материала определяются его структурой и свойствами отдельных составляющих. В случае отсутствия точной математической модели объекта исследования, которым является композитный материал, обеспечение его требуемых свойств может быть реализовано методами имитационного моделирования. Имитационная модель может быть построена на основе физического представления об объекте исследования. При этом физическая модель композитного материала сводится к высокодисперсной структуре, в которой отдельные элементы находятся в агрегатном состоянии, причем коллоидные частицы имеют термодинамические свойства соответствующей фазы состояния. Капсулирующий материал после процесса полимеризации является гетерогенным, характеризуется относительной нерастворимостью компонент, имеющих детерминированные границы раздела в пределах исследуемого объекта. Определение «топологии отдельных элементов в структуре материала» связано с решением уравнения Ван-дер-Ваальса, позволяющего учесть факторы межмолекулярного воздействия нехимического происхождения.

Следует отметить, что стоимость капсулированных установок выше стоимости однотипного оборудования обычного исполнения на 30 %, однако это в ряде случаев не является определя-

ющим фактором вследствие экономического эффекта, достигаемого улучшением показателей надежности, безопасности и долговечности установки.

Капсулирование композитными материалами установок значительно увеличит интервалы технического обслуживания при одновременном увеличении времени наработки на отказ. По статистике компании HERMETIC-Pumpen GmbH среднее время наработки на отказ для циркуляционных насосов с экранированными электродвигателями составляет 7,5 лет, а насосов с традиционными электродвигателями – 2 года.

Капсулированные установки характеризуются более высокой безопасностью. Герметичное исполнение коробок выводов, кабельной проводки и других элементов не только исключает к ним доступ газа или жидкости, но и предотвращает выброс вредных веществ в атмосферу, что позволяет использовать их в пищевой или медицинской промышленности. Капсулирование позволяет обеспечить требуемый класс безопасности при работе в агрессивных или токсичных средах. Кроме этого, использование композитных материалов повышает устойчивость установки к механическим воздействиям и приводит к снижению уровней собственных вибраций и шума.

Герметичные установки характеризуются большой компактностью и сравнительно меньшими требованиями к свободному месту, что позволяет устанавливать их в труднодоступных местах.

### Выводы

Эффективность использования электротехнических установок непосредственно определяется не только величиной потерь в самих устройствах, но и уровнем их надежности. Вопросы надежности особенно в автономных комплексах крайне важны, поэтому по мере совершенствования производства повышение требований к надежности оборудования является обязательным. Недостаточная надежность оборудования связана не только с высокой стоимостью эксплуатации из-за длительных простоев, ремонтов, наладочных операций и т.п. Выход из строя электротехнического оборудования сопровождается его простоями, убытки от которых в масштабе даже конкретного региона трудно учесть, однако во многих случаях аварийный простой в течение лишь 5...10 ч наносит убыток, превышающий себестоимость его производства. Ущерб от ненадежности – это реальный ущерб в виде простоя, приводящего к нарушению технологического процесса и другим отрицательным последствиям внутри предприятия. Сравнительный анализ показал очевидные преимущества применения композитных материалов для обеспечения требований безопасности и надежности. Применение электротехнических установок с использованием новых композиционных материалов позволяет снизить затраты на ремонт и восстановление, а в целом может рассматриваться как одно из мероприятий повышения их эффективности при инновационной модернизации промышленно-аграрных предприятий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, С. Н. Эффективность энергетического оборудования / С. Н. Иванов // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XX Междунар. науч.-техн. конф. – Тула: Инновационные технологии, 2016. – С. 80-81.
2. Дурыманов, В. В. На суше и под водой: капсулированный компрессорный агрегат STC-ECO компании Siemens / В. В. Дурыманов, С. А. Леонтьев, В. В. Седов // Турбины и дизели. – 2010. – № 2. – С. 10-15.
3. Иванов, С. Н. Эффективность надежности электроэнергетических систем / С. Н. Иванов, А. А. Скрипичев // Ученые записки КнАГТУ. Серия «Науки о природе и технике». – 2016. – № III-1(27). – С. 20-26.
4. Иванов, С. Н. Некоторые вопросы определения показателей надежности теплогенерирующих электро-механических преобразователей / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2008. – № 6. – С. 13-17.
5. Иванов, В. А. Прогрессивные самосмазывающиеся материалы на основе эпоксиэфторопластов для триботехнических систем / В. А. Иванов, Хосен Ри. – Владивосток-Хабаровск: ДВО РАН, 2000. – 429 с.

**Малахов А. В.**  
**A. V. Malakhov**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ О СТЕПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧИХ МЕСТ**

**METHOD OF PRODUCTIVITY CALCULATION OF THE METROLOGICAL COMPLEXES IN THE CONDITIONS OF INFORMATION UNCERTAINTY ABOUT EXTENT OF WORKPLACE AUTOMATION**

**Малахов Александр Владимирович** – адъюнкт кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: sanya-mall@yandex.ru.

**Mr. Aleksandr V. Malakhov** – Post-graduate Student, Faculty of Metrological Maintenance of Arms, Military and Special Equipment, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: sanya-mall@yandex.ru.

**Аннотация.** В статье представлена методика расчета производительности метрологических комплексов с применением адаптивной системы экспертных оценок и теории нечетких множеств. Учтена степень автоматизации рабочих мест по проверке средств измерений.

**Summary.** In the article, the technique of productivity calculation of metrological complexes with application of adaptive system of expert estimations and the theory of fuzzy sets is presented. The degree of automation of workplaces for verification of measuring instruments is taken into account.

**Ключевые слова:** степень автоматизации, производительность, метрологические комплексы, рабочее место по проверке средств измерений, система экспертных оценок, нечеткие множества, функция принадлежности.

**Key words:** extent of automation, productivity, metrological complexes, workplace on checking measuring instruments, system of expert estimation, indistinct sets, function of accessory.

УДК 78.21.35

**Введение**

В последние годы военно-техническая политика ведущих зарубежных стран отличается высокой динамичностью, активностью, гибкостью, сконцентрированностью на приоритетных направлениях военно-технического строительства. Основной ее задачей является создание систем вооружений, способных за счет качественного превосходства обеспечить успешное решение национальными вооруженными силами боевых задач с возможностью навязывания противнику в ходе боевых действий выгодных для себя форм и способов вооруженного противоборства. Существенное нарастание оперативных и боевых возможностей вооруженных сил ведущих зарубежных государств за счет их оснащения высокоэффективными вооружением, военной и специальной техникой, стремление достигать своих политических целей силовым способом в обход решений международных политических организаций обуславливают вероятность активизации текущих и возникновения новых военных конфликтов, в которые может быть втянута Россия [1]. Высокие и постоянно возрастающие военно-стратегические и оперативные возможности вооруженных сил ведущих государств мира, обусловленные техническим совершенством их систем вооружения, предъявляют жесткие требования к перспективному облику Вооруженных Сил Российской Федерации в интересах обеспечения обороны и безопасности России.

Важное место в техническом оснащении отводится метрологическому обеспечению Вооруженных Сил Российской Федерации, под которым понимается комплекс мероприятий по установлению и применению научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности, полноты, своевременности и экономичности измерений в войсках [2].

Организованность и целенаправленность процесса метрологического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации ориентированы на поддержание боеспособности воинских частей и здоровья личного состава, обеспечение боевой готовности войск (сил), готовности к применению, эффективности использования по назначению и безаварийности эксплуатации вооружения, военной и специальной техники, экономии всех видов ресурсов при боевом, а также материально-техническом обеспечении.

Одним из приоритетных направлений развития метрологического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации является широкое применение подвижных лабораторий измерительной техники для метрологического обслуживания вооружения, военной и специальной, а также средств измерений военного назначения непосредственно в местах их эксплуатации [3]. Это объясняет наличие существующих и планируемых опытно-конструкторских работ, направленных на разработку и модернизацию подвижных лабораторий измерительной техники.

При военно-научном обосновании разработки перспективных и повышения эффективности функционирования существующих подвижных лабораторий измерительной техники, а также разработке методов оценивания тактико-технических характеристик подвижных лабораторий измерительной техники при их контроле и испытаниях применяется большая номенклатура показателей. Особое внимание уделяется их производительности, которая оказывает непосредственное влияние на результативность и оперативность метрологического обслуживания средств измерений военного назначения в местах их установки.

Для формирования материалов информационной поддержки принятия решения по дальнейшему направлению развития мобильных метрологических комплексов разрабатывается и используется комплекс расчетно-аналитических и информационных задач, решаемых должностными лицами метрологических служб, в состав которых входят различные виды расчетов по организации эксплуатации измерительной техники, восстановлению средств измерений, предполагаемому выходу из строя, распределению сил и средств метрологического обеспечения для обслуживания и ремонта, а также производительности метрологических воинских частей в мирное время и на особый период [4].

### **Существующая методика расчета производительности**

Определение производительности проводится по следующей формуле:

$$n_i = \frac{\Phi_d \cdot Q_t}{\tau_i},$$

где  $n_i$  – возможности рабочего места по выполнению  $i$ -го вида обслуживания средств измерений  $t$ -го вида измерений;  $\Phi_d$  – действительный фонд рабочего времени одного поверителя;  $Q_t$  – количество поверителей средств измерений  $t$ -го типа;  $\tau_i$  – нормы времени по выполнению  $i$ -го вида обслуживания средств измерений  $t$ -го вида измерений.

Также недостатком является наличие в расчете такого показателя, как нормы времени, определение и утверждение которых проводится на основе выполнения хронометражных наблюдений за операциями, из которых состоит поверочная работа, и обработки результатов этих наблюдений. Корректировка и уточнение данного показателя – трудоемкий и затратный процесс. В связи с этим нормы времени разрабатываются и корректируются один раз в 5-10 лет.

Предлагаемая методика является дальнейшим развитием научно-методического аппарата к определению производительности с учетом специфики применяемых сил и средств метрологического обеспечения (подвижных лабораторий измерительной техники), а также исключает наличие вышеперечисленных недостатков.

Однозначное определение степени автоматизации рабочих мест требует привлечения большого количества специалистов в области метрологического обеспечения. Другой сложностью является наличие огромного количества средств измерений, имеющих различные конструктивные особенности, такие как наличие интерфейсов, программного обеспечения, различные пределы и классы точности, количество определяемых метрологических характеристик в процессе их поверки и т.д.

В настоящее время все большее внимание уделяется созданию адаптивных систем экспертных оценок, совершенствованию алгоритмов статистической обработки информации и разработке технологии экспертизы [5]. Перспективным представляется применение методов теории нечетких множеств, значительно расширяющих возможности учета неопределенностей различной природы. Для определения степени автоматизации рабочих мест по поверке средств измерений применение аппарата нечеткой логики позволяет работать с существующей неопределенностью, неполнотой и нечеткостью информации. Выбор решения по числовой информации в условиях неопределенности возникает в том случае, когда с каждым принимаемым решением связано некоторое множество возможных результатов с известными условными вероятностями [6]. Поэтому использование аппарата нечеткой логики при разработке базы знаний и механизмов вывода экспертных оценок позволяет формализовать процедуру определения степени автоматизации на базе фрагментарной, ненадежной и возможно неточной информации и обоснованно принимать решения по дальнейшим расчетам. Нечеткая экспертная система использует представление знаний в форме нечетких продукций и лингвистических переменных.

Следовательно, определение степени автоматизации и дальнейшего расчета производительности рабочих мест и мобильных метрологических комплексов в целом с применением нечеткой логики является актуальным.

Процесс определения состоит из нескольких этапов. Далее рассмотрим особенности каждого этапа более подробно.

#### **Определение количества привлекаемых специалистов**

Итак, на первом этапе требуется определить достаточное количество привлекаемых специалистов.

В качестве экспертной группы выступает личный состав метрологических воинских частей и подразделений, занимающие штатные должности не менее одного года, а также представители органов военного управления – управления метрологии Вооруженных сил Российской Федерации. При этом на основе критериев и шкал (см. табл. 1) каждый привлекаемый эксперт оценивается коэффициентом компетентности  $q$  с помощью следующего выражения:

$$q_j = \frac{\sum_{l=1}^L v_{jl}}{\sum_{l=1}^L v_{l\max}},$$

где  $v_{jl}$  – вес  $j$ -го эксперта по  $l$ -му критерию;  $v_{l\max}$  – предельный вес  $l$ -го критерия;  $L$  – общее количество критериев.

Численность группы экспертов определяется из условия [7]

$$\xi \leq m \leq \frac{3 \cdot \sum_{j=1}^J q_j}{2 \cdot q_{\max}}, \quad (1)$$

где  $\xi$  – общее количество проводимых операций;  $q_{\max} = 1$  – максимально возможное значение коэффициента компетентности экспертов.

Таблица 1

## Критерии и шкалы уровня компетентности экспертов

Критерий \ Вес	Уровень образования экспертов	Занимаемые должности экспертов	Количество удостоверений на право поверки	Опыт работы в области метрологического обеспечения
1	Среднее	Техник, техник-начальник лаборатории	1	2 года
2	Среднее техническое	Инженер отделения	2	от 2 до 3 лет
3	Бакалавр	Начальник отделения, заместитель начальника отделения	3	от 3 до 5 лет
4	Специалист	Начальник отдела, заместитель начальника отдела	4	от 5 до 7 лет
5	Магистр	Руководитель подразделения, заместитель руководителя подразделения	5	более 7 лет

Если условие (1) не выполняется, то в экспертную группу привлекается еще один или несколько экспертов. В результате формируется экспертная группа, которая характеризуется матрицей-строкой компетентности

$$Q = (q_j)_{j=1..J} = (q_1, q_2, \dots, q_J).$$

### Разработка перечня вопросов экспертизы

На втором этапе разрабатывается перечень вопросов предстоящей экспертизы. Разработка опросного листа экспертизы предполагает создание списка факторов, позволяющих экспертам определить степень автоматизации (см. табл. 2). Перед проведением очередной экспертизы данный список может корректироваться под решаемые задачи.

Таблица 2

### Перечень вопросов экспертных оценок

Привлекаемые эксперты	Этапы проведения поверки средств измерений на рабочем месте			
	Внешний осмотр	Опробование средств измерений	Определение метрологических характеристик	Оформление результатов поверки
1				
...				
<i>J</i>				

Определение субъективной степени автоматизации рабочих мест осуществляется путем заполнения табл. 1 каждым привлекаемым экспертом. При этом каждый эксперт для *i*-го этапа выставляет индивидуальную оценку  $p_{ij} \in [0,1]$ . Эта оценка является субъективной степенью автома-

тизации  $i$ -го этапа поверки средств измерений. Оценочная шкала представляет собой числовые значения в интервале от 0 до 1, что соответствует процентному соотношению выполняемых функций поверителем в ручном режиме и автоматическом к общему объему проводимых операций этапа в числителе таблицы, а также эксперты определяют степень автоматизации лингвистическими переменными «низкая», «средняя», «высокая» в знаменателе.

Из проведенного анализа руководящей и нормативно-технической документации на средства измерений процесс поверки делится на несколько основных этапов (см. рис. 1):

1. Внешний осмотр средств измерений:

– проверка комплектности, маркировки, наличия обозначений классов точностей и единиц физической величины;

– проверка отсутствия внешних дефектов и другие.

2. Опробование средств измерений.

3. Определение метрологических характеристик.

4. Оформление результатов поверки.



Рис. 1. Схема процесса поверки средств измерений

**Обработка результатов экспертизы**

Третий этап представляет собой обработку результатов проведенной экспертизы. В результате по каждому этапу поверки средств измерений формируются матрицы

$$P = (p_{ij}) = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1J} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{I1} & p_{I2} & \dots & p_{IJ} \end{pmatrix}$$

Для учета уровня компетентности экспертов каждая матрица  $P_k$  преобразуется в

$$W = (w_{ij}) = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1J} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{I1} & w_{I2} & \dots & w_{IJ} \end{pmatrix},$$

где  $w_{ij} = p_{ij} \cdot q_j$

Столбцы в матрице являются исходными данными для построения функции принадлежности степени автоматизации  $i$ -го этапа поверки средств измерений на рабочем месте  $\mu_i(x)$ .

В процессе обработки мнений экспертов имеем четыре функции принадлежности. Первый этап (внешний осмотр) не требует много времени, оказывает несущественное влияние на производительность при поверке и экономически не выгоден при попытке их автоматизировать, следовательно, результирующая степень автоматизации и графики функций принадлежности определяют-

ся по остальным этапам. Так как все этапы являются составными частями одного процесса, то результирующая степень автоматизации будет определяться по следующей формуле:

$$\mu_{\Sigma i}(x) = \bigcup_{k=1}^4 \mu_i(x).$$

### Определение «нечетких» производственных возможностей

Четвертый этап представляет собой расчет «нечетких» производственных возможностей:

$$П_i(x) = \frac{\Phi \cdot Q}{(1 - \mu_{\Sigma i}(x)) \cdot \tau_i}, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – действительный фонд рабочего времени поверителя;  $\tau_i$  – нормы времени по выполнению метрологического обслуживания средств измерений  $i$ -го вида измерений;  $\mu_{\Sigma i}(x)$  – результирующая степень автоматизации;  $Q$  – количество поверителей.

«Нечеткие» производственные возможности рабочего места определяются по алгоритму нечёткого логического вывода Мамдани в пакете Fuzzy Logic Toolbox в вычислительной среде MATLAB [8]. Для этого необходимо сформировать базу правил нечеткого вывода (см. табл. 3).

Таблица 3

База правил нечеткого вывода степени автоматизации

Номер правила	Условия						Вывод	
	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <1>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <2>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <3>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <4>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <5>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <6>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <7>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «В»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <8>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «В»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <9>:	ЕСЛИ	Опр «Н»	И	ОМх «В»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <10>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <11>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <12>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <13>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <14>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <15>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <16>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «В»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <17>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «В»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <18>:	ЕСЛИ	Опр «Ср»	И	ОМх «В»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Высокая»
ПРАВИЛО <19>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <20>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <21>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «Н»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <22>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Низкая»
ПРАВИЛО <23>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <24>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «Ср»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <25>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «В»	И	ОфР «Н»	ТО	СА «Средняя»
ПРАВИЛО <26>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «В»	И	ОфР «Ср»	ТО	СА «Высокая»
ПРАВИЛО <27>:	ЕСЛИ	Опр «В»	И	ОМх «В»	И	ОфР «В»	ТО	СА «Высокая»

Примечание: Опр – опробование поверяемого средства измерения; ОМх – определение метрологических характеристик поверяемого средства измерения; ОфР – оформление результатов поверки средства измерения; СА – степень автоматизации процесса поверки на рабочем месте; Н – низкая степень автоматизации; Ср – средняя степень автоматизации; В – высокая степень автоматизации

Специальные средства нечеткого моделирования в MATLAB позволили выполнять весь комплекс исследований и расчетов по разработке и применению нечетких моделей при определении результирующей степени автоматизации рабочего места с привлечением экспертной группы [9]. Именно по этим причинам эта система была выбрана в качестве программного средства, в рамках которого можно реализовать теоретические концепции нечетких множеств и процедуры нечеткого вывода (см. рис. 2).

Степень уверенности посылки (принадлежности antecedента, степень реализации правила) вычисляется с помощью двух операторов: MIN (...) и MAX (...). Первый вычисляет минимальное значение степени принадлежности, а второй – максимальное значение. Применение того или иного оператора определяется связкой, которой соединены посылки в правиле. При использовании связки И применяется оператор MIN (...), а при использовании связи ИЛИ – оператор MAX (...), в данном случае используем оператор MIN (...).

### Определение производительности рабочего места

Для перехода к точным значениям степени автоматизации рабочего места в процедуре используется метод «Центра тяжести». Физическим аналогом этого метода является нахождение центра тяжести плоской фигуры, ограниченной осями координат и графиком функций принадлежности нечеткого множества.

Аналогичным образом производительность рассчитывается для каждого рабочего места. Полученные результаты суммируются, далее определяется производительность всего мобильного метрологического комплекса.

### Расчетный пример

Дано: автоматизированное рабочее место для поверки, регулировки и текущего ремонта средств измерений радиотехнических величин С6, Е6, Л2, В2, В3, В6, В7, В8, В9 (АРМ-1-3), входящее в состав подвижной лаборатории измерительной техники. Количество поверителей ( $Q$ ) – один человек. Действительный фонд рабочего времени поверителя ( $\Phi$ ) – 8 ч. Нормы времени ( $\tau_i$ ) по проведению поверки вольтметра цифрового дифференциального В2-27 – 6 ч.

Результирующая степень автоматизации (см. табл. 4) АРМ-1-3  $\mu_{\Sigma_i}(x) = 0,815$ .

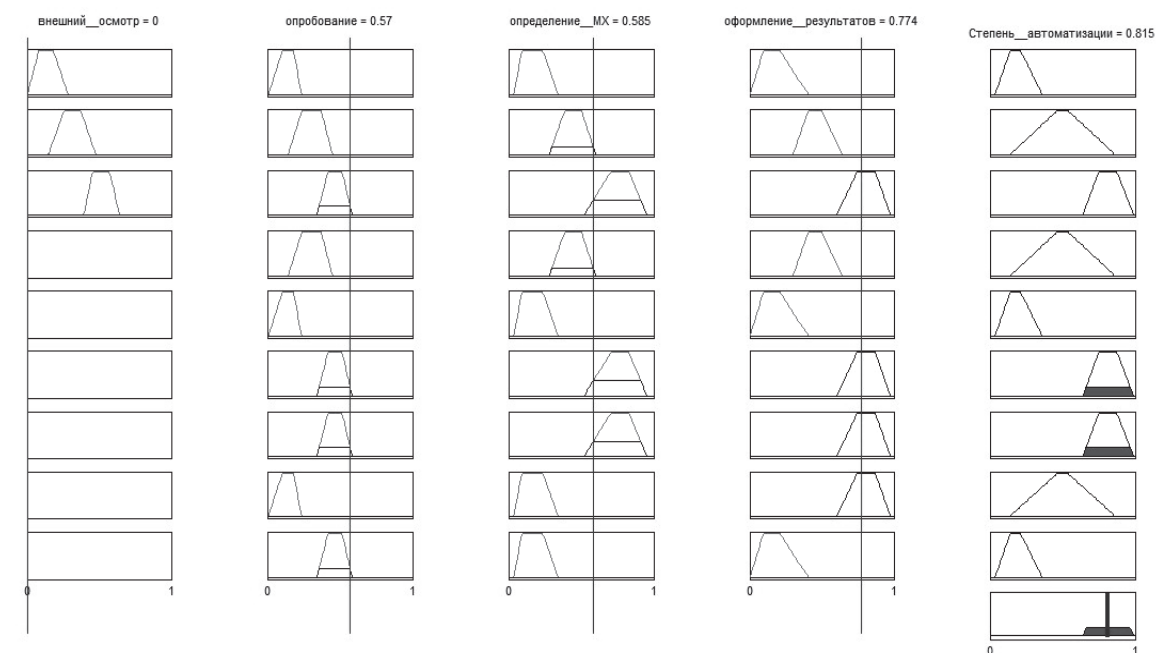


Рис. 2. Определение степени автоматизации

## Обобщенная оценка степени автоматизации рабочего места

Оценки	Этапы проведения поверки средств измерений на рабочем месте			
	Внешний осмотр	Опробование СИ	Определение МХ	Оформление результатов
Эксперты	0	0,57	0,585	0,774
	низкая	средняя	средняя	высокая

Подставляя значения в формулу (2), получаем производительность – семь средств измерений типа В2-27. При расчете производительности по существующей методике получаем один прибор. График зависимости производительности от степени автоматизации представлен на рис. 3.

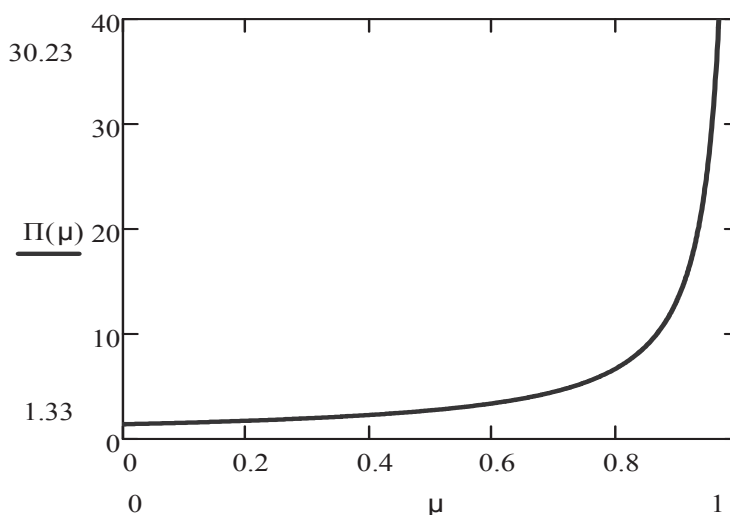


Рис. 3. Зависимость производительности от степени автоматизации

### Заключение

В результате разработанная методика определения производительности мобильных метрологических комплексов позволяет более качественно проводить военно-научное и технико-экономическое обоснование процессов создания перспективных систем метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники, а также повысить эффективность существующих ее образцов при разработке методов и технических средств метрологического обеспечения средств измерений военного назначения, оценивании тактико-технических характеристик подвижных лабораторий измерительной техники при их контроле и испытаниях. Данная методика позволяет решать одну из основных задач по планированию, организации, проведению и контролю выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению Вооруженных Сил в мирное время и на особый период.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов, Ю. И. Основные направления развития вооружения военной и специальной техники / Ю. И. Борисов // Оборонный комплекс Российской Федерации: состояние и перспективы развития. – 2011. – Т. 7.

**Малахов А. В.**

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ О СТЕПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧИХ МЕСТ

2. Лесун, И. В. Основные направления развития метрологического обеспечения вооружения и военной техники / И. В. Лесун // Оборонный комплекс Российской Федерации: состояние и перспективы развития, 2011. – Т. 7.
3. Гусеница, Я. Н. Показатели качества подвижных лабораторий измерительной техники / Я. Н. Гусеница, А. В. Малахов, Ю. А. Широкова // СРДР, Серия Б. Вып. 112. – М.: ЦВНИ МО РФ. – 288 с.
4. Харин, В. Н. Управление метрологическим обеспечением: учеб. пособие. Ч. 1 / В. Н. Харин, А. П. Демин, А. И. Журавин. – СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 103 с.
5. Бухарин, С. В. Экспертные системы оценки качества: моногр. / Е. С. Забияко, В. В. Конобеевских, С. В. Бухарин. – Воронеж: ИММФ, 2006. – 200 с.
6. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976.
7. Гусеница, Я. Н. Метод экспертизы программного обеспечения вооружения, военной и специальной техники / Я. Н. Гусеница // Техника средств связи. Научно-технический сборник. – 2014. – Вып. № 3 (142). – С. 118-122.
8. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 288 с.
9. Коньшева, Л. К. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие / Л. К. Коньшева, Д. М. Назаров. – СПб.: Питер, 2011. – 192.



Куделько А. Р., Сочелев А. Ф.

A. R. Kudelko, A. F. Sochelev

**ОСОБЕННОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**FEATURES OF EQUIVALENT TRANSFORMATION OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS FOR THE ELEMENTS OF FUNCTIONAL BLOCKS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS**

**Куделько Анатолий Романович** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8(914)184-25-59. E-mail: kuipp-kar@knastu.ru.

**Mr. Anatoly R. Kudelko** – PhD in technical sciences, Professor, Innovation management processes and projects Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur plant, etc. Lenin, 27; 8(914)-184-25-59. E-mail: kuipp-kar@knastu.ru.

**Сочелев Анатолий Федорович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681032, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 8(914)-210-56-77. E-mail: a.socheliev@mail.ru.

**Mr. Anatoly F. Sochelev** – PhD in technical sciences, the senior lecturer, Innovation management processes and projects Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681032, Komsomolsk-on-Amur plant, etc. Lenin, 27; 8(914)-210-56-77. E-mail: a.socheliev@mail.ru.

**Аннотация.** Рассматриваются эквивалентные преобразования структуры и параметров элементов многополюсников, которые широко применяются как компоненты систем управления различными объектами. Получены условия практической реализуемости эквивалентных схем в нестандартных ситуациях, когда в результате преобразований появляются элементы с «отрицательным сопротивлением». Реализуемость достигается с введением в структуру эквивалентной схемы управляемого источника электроэнергии.

**Summary.** Equivalent transformations of the structure and parameters of the elements of multi-poles are considered, which are widely used as components of control systems for various objects. The conditions for practical realizability of equivalent circuits in non-standard situations are obtained, when because of transformations elements with "negative resistance" appear. Realization is achieved with the introduction into the structure of an equivalent scheme of a controlled electric power source.

**Ключевые слова:** элементы систем управления, многополюсники, эквивалентные преобразования, дополнительный источник, управляемый ток источник напряжения.

**Key words:** elements of control systems, multi-ports, equivalent transformations, additional source, current-controlled voltage source.

УДК 621.3.01(07)

При формировании структуры и определении параметров элементов систем управления различными объектами возникают задачи эквивалентных преобразований, обеспечивающих упрощение и/или повышение эффективности анализа, синтеза и в конечном итоге построения компонентов систем управления. К таким преобразованиям можно отнести, например, преобразования трехфазной нагрузки из «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду», П-образной схемы замещения четырехполюсника или фильтра в эквивалентную Т-образную схему замещения и др.

В ряде случаев в результате таких преобразований возникают ситуации, когда в полученной эквивалентной структуре присутствуют элементы с отрицательным активным сопротивлением. Подобные ситуации возникают, как уже было отмечено, в трехфазных цепях, четырехполюсниках и фильтрах.

В качестве примера рассмотрим преобразование «треугольника» сопротивлений (схема на рис. 1) трехфазной нагрузки в эквивалентную «звезду» (схема на рис. 2).

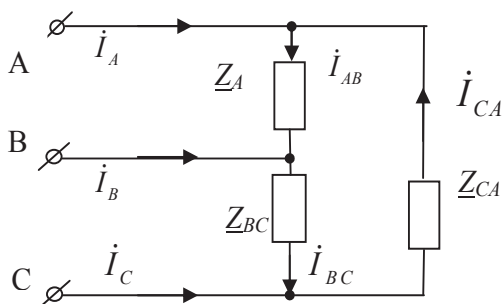


Рис. 1

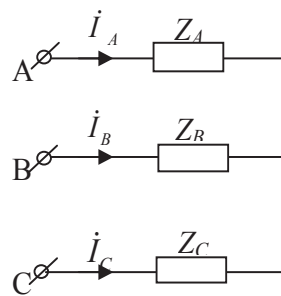


Рис. 2

Сопротивления фаз нагрузки исходной схемы (см. рис. 1) определим значениями

$$\underline{Z}_{AB} = j \cdot 50 \text{ Ом}; \underline{Z}_{BC} = 10 + j \cdot 50 \text{ Ом}; \underline{Z}_{CA} = j \cdot 50 \text{ Ом}.$$

Используя соответствующие формулы преобразования [2], определим сопротивления эквивалентной «звезды» (см. рис. 2)

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{Z}_{AB} \underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} = -1,106 \ 19 + j16,559 \ 29 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_{BC} \underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} = 2,212 \ 39 + j16,8141 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{CA} \underline{Z}_{BC}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} = 2,212 \ 39 + j16,8141 \text{ Ом}.$$

Как следует из полученных результатов в эквивалентном сопротивлении  $\underline{Z}_A$  действительная часть меньше нуля (отрицательная). Исходя из физических представлений, численное значение активного линейного сопротивления не может быть меньше нуля. При этом обратное преобразование такой «звезды» в эквивалентный «треугольник» дает исходные значения параметров элементов схемы на рис. 1

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \frac{\underline{Z}_A \underline{Z}_B}{\underline{Z}_C} = j \cdot 50 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_B + \underline{Z}_C + \frac{\underline{Z}_B \underline{Z}_C}{\underline{Z}_A} = 10 + j \cdot 50 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_C + \underline{Z}_A + \frac{\underline{Z}_C \underline{Z}_A}{\underline{Z}_B} = j \cdot 50 \text{ Ом}.$$

В работе [1] аналогичная ситуация объясняется тем, что эквивалентные преобразования справедливы математически с сохранением баланса мощностей, но не предлагаются условия физической реализуемости эквивалентной схемы.

Авторами предлагаемой работы делается попытка сформировать такие условия и обеспечить в эквивалентных преобразованиях физическую реализуемость полученной эквивалентной схемы.

Так, для подтверждения сходимости баланса мощностей реализуем расчет токов нагрузки  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  схемы на рис. 2, подключенной к трехполюсному источнику электроэнергии ABC (см. рис. 3).

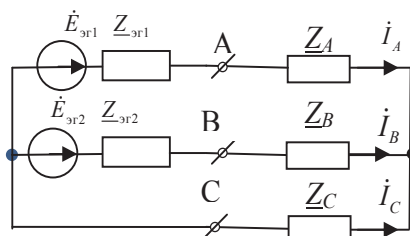


Рис. 3

Численные значения параметров элементов источника энергии равны

$$\dot{E}_{ЭГ2} = j \cdot 173,205 \text{ В}; \underline{Z}_{ЭГ2} = 10 \text{ Ом.}$$

Для расчета токов воспользуемся методом двух узлов [3]. Комплексы сопротивлений ветвей схемы на рис. 3 равны

$$\underline{Z}_{As} = \underline{Z}_A + \underline{Z}_{ЭГ1} = 8,893 \ 80 + j \cdot 16,5929 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{Bs} = \underline{Z}_B + \underline{Z}_{ЭГ2} = 12,2124 + j \cdot 16,8141 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{Cs} = \underline{Z}_C = 2,212 \ 39 + j \cdot 16,8141 \text{ Ом.}$$

Комплекс действующего значения напряжения между узлами

$$\dot{U}_n = \frac{\frac{\dot{E}_{ЭГ1}}{\underline{Z}_{As}} + \frac{\dot{E}_{ЭГ2}}{\underline{Z}_{Bs}}}{\frac{1}{\underline{Z}_{As}} + \frac{1}{\underline{Z}_{Bs}} + \frac{1}{\underline{Z}_{Cs}}} = -65,3569 + j76,4499 \text{ В.}$$

В результате токи ветвей схемы на рис. 3 равны

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_{ЭГ1} - \dot{U}_n}{\underline{Z}_{As}} = -1,648 \ 67 + j4,217 \ 47 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_{ЭГ2} - \dot{U}_n}{\underline{Z}_{Bs}} = 5,615 \ 31 + j0,191 \ 472 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{-\dot{U}_n}{\underline{Z}_{Cs}} = -3,966 \ 64 - j4,408 \ 94 \text{ А.}$$

Расчет комплексов полных (кажущихся) мощностей приемников и источников дает их соответствующие значения

$$\tilde{S}_n = (|\dot{I}_A|)^2 \cdot \underline{Z}_{As} + (|\dot{I}_B|)^2 \cdot \underline{Z}_{Bs} + (|\dot{I}_C|)^2 \cdot \underline{Z}_{Cs} = 645,710 + j \cdot 1462,44 \text{ ВА};$$

$$\tilde{S}_i = \dot{E}_{ЭГ1} \cdot \hat{I}_A + \dot{E}_{ЭГ2} \cdot \hat{I}_B = 645,710 + j \cdot 1462,44 \text{ ВА.}$$

Из полученных значений следует, что балансы активной, реактивной и полной (кажущейся) мощностей сходятся.

Проделаем аналогичные расчеты, но вместо  $\underline{Z}_A$  используем физически реализуемое эквивалентное сопротивление

$$\underline{Z}_{Ap} = -\operatorname{Re}(\underline{Z}_A) + j \cdot \operatorname{Im}(\underline{Z}_A) = 1,106\ 19 + j \cdot 16,5929\ \text{Ом.}$$

При этом последовательно с этим сопротивлением включим дополнительный источник напряжения с ЭДС  $\dot{E}_d$  (см. рис. 4).

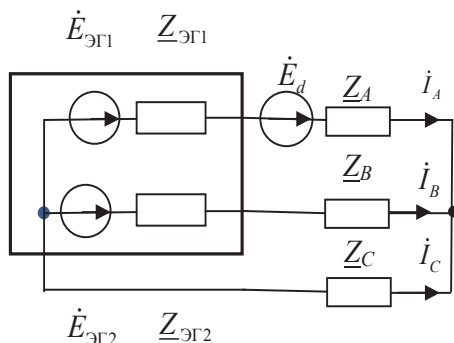


Рис. 4

Для определения значения ЭДС этого источника должны выполняться следующие условия эквивалентности: токи ветвей и напряжение между узлами  $\dot{U}_n$  должно остаться прежним. Найдем величину ЭДС дополнительного источника из уравнения

$$\dot{U}_n = \frac{\frac{\dot{E}_{ЭГ1} + \dot{E}_d}{\underline{Z}_{As}} + \frac{\dot{E}_{ЭГ2}}{\underline{Z}_{Bs}}}{\frac{1}{\underline{Z}_{As}} + \frac{1}{\underline{Z}_{Bs}} + \frac{1}{\underline{Z}_{Cs}}} \dot{E}_d = -3,647\ 51 + j \cdot 9,330\ 68\ \text{В.}$$

С учетом введенного дополнительного источника напряжения токи ветвей схемы на рис. 4 равны

$$\begin{aligned} \dot{i}_A &= \frac{\dot{E}_{ЭГ1} + \dot{E}_d - \dot{U}_n}{\underline{Z}_{As}} = -1,648\ 67 + j4,217\ 47\ \text{А}; \\ \dot{i}_B &= \frac{\dot{E}_{ЭГ2} - \dot{U}_n}{\underline{Z}_{Bs}} = 5,615\ 31 + j0,191\ 472\ \text{А}; \\ \dot{i}_C &= \frac{-\dot{U}_n}{\underline{Z}_{Cs}} = -3,966\ 64 - j4,408\ 94\ \text{А}. \end{aligned}$$

Сравнивая их с ранее определенными токами для схемы на рис. 3, можно отметить, что результаты полностью совпадают. Расчет баланса мощностей для схемы на рис. 4 также дает совпадение с аналогичными результатами для схемы на рис. 3

$$\begin{aligned} \tilde{S}_n &= \left( |\dot{i}_A| \right)^2 \cdot \underline{Z}_{As} + \left( |\dot{i}_B| \right)^2 \cdot \underline{Z}_{Bs} + \left( |\dot{i}_C| \right)^2 \cdot \underline{Z}_{Cs} - \dot{E}_d \cdot \hat{I}_A = 645,710 + j \cdot 1462,44\ \text{ВА}; \\ \tilde{S}_i &= \dot{E}_{ЭГ1} \cdot \hat{I}_A + \dot{E}_{ЭГ2} \cdot \hat{I}_B = 645,710 + j \cdot 1462,44\ \text{ВА}. \end{aligned}$$

Таким образом, схемы, изображенные на рис. 3 – 4, с учетом упомянутых значений параметров их элементов являются эквивалентными, а «звезда» нагрузки каждой из них (в том числе с дополнительным источником напряжения в схеме на рис. 4) эквивалентна «треугольнику» сопротивлений на рис. 1.

Определим значение ЭДС дополнительного источника напряжения через ток и удвоенное активное сопротивление этой же ветви схемы в соответствии с выражением

$$\dot{E}_d = \dot{I}_A \cdot (-\operatorname{Re}(Z_A)) \cdot 2 = -3,647\ 51 + j \cdot 9,330\ 68\ \text{В.}$$

Результат также совпадает с ранее полученным значением этой же величины.

Таким образом, доказано, что отрицательная действительная часть эквивалентного сопротивления, полученная в результате преобразования «треугольника» сопротивлений в эквивалентную «звезду», может быть представлена совокупностью управляемого током этой же ветви источника напряжения и реального сопротивления, как это изображено на рис. 5, где значения параметров этих элементов определяются выражениями

$$\begin{aligned} \dot{E}_d &= \dot{I}_A \cdot (-\operatorname{Re}(Z_A)) \cdot 2\ \text{В}; \\ Z_{Ap} &= -\operatorname{Re}(Z_A) + j \cdot \operatorname{Im}(Z_A)\ \text{Ом.} \end{aligned}$$

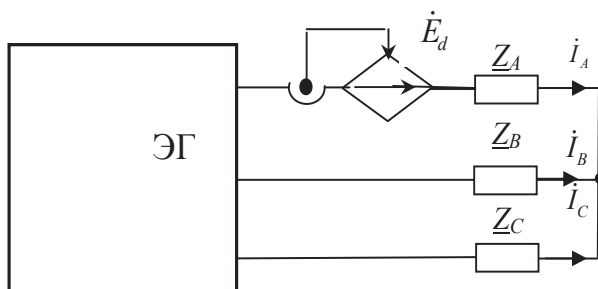


Рис. 5

Введение дополнительного (фиктивного) управляемого источника напряжения можно объяснить наличием ЭДС самоиндукции у реактивных (индуктивных) составляющих сопротивлений соответствующих ветвей и/или запасанием энергии электрического поля емкостными элементами.

Полученный результат может быть использован, например, при преобразовании П-образной схемы замещения четырехполюсника (см. рис. 6) в эквивалентную Т-образную схему замещения (см. рис. 7).

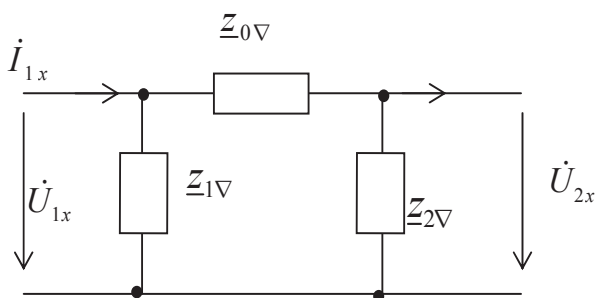


Рис. 6

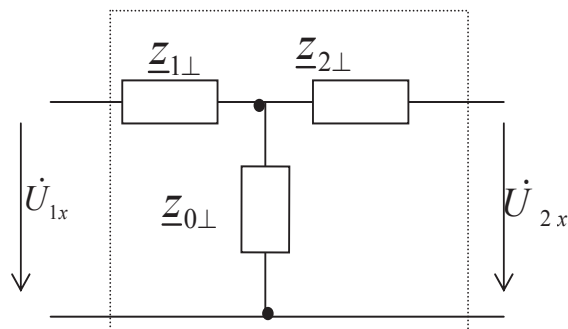


Рис. 7

Принимая значения сопротивлений элементов схемы на рис. 6 аналогичными заданным в первом рассмотренном здесь примере, также получим (см. рис. 7), что  $z_{1L}$  будет иметь отрицательную действительную часть. Воспользовавшись тем же подходом, эквивалентную схему четырехполюсника (см. рис. 7) можно представить в виде, изображенном на рис. 8.

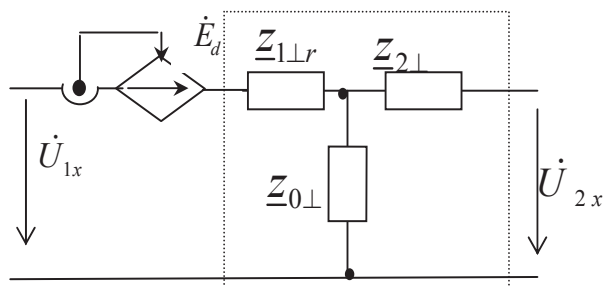


Рис. 8

Здесь  $\dot{E}_d = \dot{I}_{1x} \cdot (-\operatorname{Re}(Z_{1\perp})) \cdot 2 \text{ В}$ ;  $Z_{1\perp r} = -\operatorname{Re}(Z_{1\perp}) + j \cdot \operatorname{Im}(Z_{1\perp}) \text{ Ом}$ .

В заключении можно констатировать, что если в результате преобразований необходимо создать физически реальную эквивалентную «звезду» нагрузок или Т-образную схему замещения четырехполюсника, то полученные результаты обеспечивают возможность такой реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. В 3 т. Т. 1 / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман [и др.]. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 463 с.
2. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи постоянного тока: учеб. пособие / А. Р. Куделько, В. С. Саяпин [и др.]; под ред. А. Ф. Сочелева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 76 с.
3. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи переменного (синусоидального) тока: учеб. пособие / А. Р. Куделько, В. С. Саяпин [и др.]; под ред. А. Н. Степанова. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 128 с.



**Загорский М. Ю., Нечипас Ю. П., Соловьев А. В.**

**M. Y. Zagorskii, Y. P. Nechipas, A. V. Solovyov**

## **ФОРМИРОВАНИЕ МАСКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТОВ НА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

## **FORMATION OF MASKS FOR IMPROVING CONTRASTS IN SMALL-SIZED DETAILS IN THE IMAGE**

**Загорский Михаил Юрьевич** – преподаватель кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: zagorskii.m@gmail.com.

**Mr. Mikhail Y. Zagorskii** – Associate professor, Department of phototopography and photogrammetry, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: zagorskii.m@gmail.com.

**Нечипас Юрий Павлович** – доцент кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: solov19882008@mail.ru.

**Mr. Yurii P. Nechipas** – Associate professor, Department of phototopography and photogrammetry, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: solov19882008@mail.ru.

**Соловьев Алексей Владимирович** – младший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: solov19882008@mail.ru.

**Mr. Aleksey V. Solovyov** – junior researcher, Military University (research and development), Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St. Petersburg). E-mail: solov19882008@mail.ru.

**Аннотация.** Рассматривается задача повышения контраста малоразмерных деталей на изображении. Проблемный элемент задачи состоит в том, что размеры в пикселях этих деталей и размеры шумовых факторов часто совпадают и контрастирование реализуется не влиянием геометрии сигнала от детали, а влиянием шумов, при котором малоразмерные детали искажаются. В работе предлагается использование аналогии с процессом распространения тепла на теплопроводящей поверхности. Исходное изображение принимается как начальное распределение тепла. Изменение во времени этого распределения тепла – хорошо изученный физический процесс, и математика позволяет рассчитать, каким было распределение тепла мгновение назад. Решение уравнения распределения тепла в обратном времени – основной элемент решения задачи. Приведены результаты контрастирования малых деталей на реальных изображениях.

**Summary.** The problem of increasing the contrast of small-sized details in the image is considered. The problematic element of the problem is that the dimensions in pixels of these parts and the size of the noise factors often coincide and contrasting is realized not by the influence of the geometry of the signal from the part, but by the influence of noise, in which small-sized details are distorted. The paper suggests the use of analogy with the process of heat propagation on a heat-conducting surface. The original image is adopted as the initial heat distribution. The change in time of this heat distribution is a well-studied physical process, and mathematics allows us to calculate how the heat distribution was a moment ago. The solution of the heat distribution equation in reverse time is the main element of the solution of the problem. The results of contrasting small details on real images are given.

**Ключевые слова:** повышение контрастов, контрастирование малых объектов, малоразмерные объекты, контрастная маска, микроконтрасты.

**Key words:** increase in contrasts, contrasting of small objects, small objects, contrast mask, microcontrasts.

УДК 355(623.64)

Повышение контрастов на малоразмерных объектах изображения – проблемная задача. При ряде вариантов ее решения используют различные виды масок, часть из которых (лапласианы)

представлены на рис. 1. Использование масок позволяет одновременно вовлекать в обработку изображений дифференцирующие и сглаживающие свойства масок, выбираемых для свертки с изображением.

Использование дифференцирующих свойств масок реализуются путем включения во множество их весовых коэффициентов цепочек равных чисел с разными знаками (см. рис. 1). От направления этих цепочек зависит направление выделяемых объектов, а от весовых коэффициентов – типы объектов (темный на светлом фоне и наоборот).

Аналогично дифференцирующим, сглаживающие свойства масок реализуются путем включения во множество их весовых коэффициентов цепочек чисел с одинаковыми знаками (необходимо помнить, что среднее значение суммы всех весовых коэффициентов должно быть равно единице, для чего в программах вычисления свертки (из состава Фотошоп, ACD See) имеется пара параметров).

Сглаживающие и дифференцирующие свойства являются своего рода «антагонистами», что вызывает проблемы в их регулировании. Кроме того, результат свертки маски с изображением зависит от установки осей доминирующих направлений, которыми являются сами оси  $X$  и  $Y$  изображений. Вдоль и поперек этих направлений дифференцирующие и сглаживающие свойства маски проявляются с разной силой.

Для упрощения регулировки баланса дифференцирующих и сглаживающих свойств матриц желательно сопоставить процедурам свертки модель развития некоторого, хорошо изученного физического процесса, представляемого так же, как и изображение – функцией двух переменных.

В настоящей статье предлагается для синтеза маски использовать модель распространения тепла (температуру рассматриваем как яркость) в теплопроводящей среде. При этом процесс распространения тепла рассматривается в обратном ходе времени, что физически не реализуемо.

На рис. 2 представлена теплопроводящая пластина. Она нагрета в одной точке, и затем источник тепла убран. Процесс нагрева в точке был не мгновенным – растянут во времени. За это время тепло от точки нагрева распространилось вдоль пластины, и в момент убирания источника тепла распределение температуры установилось, как показано на рис. 2, кривой  $T_0$ . Далее, в отсутствие источника тепла распределение температур дается кривой  $T_1$ .

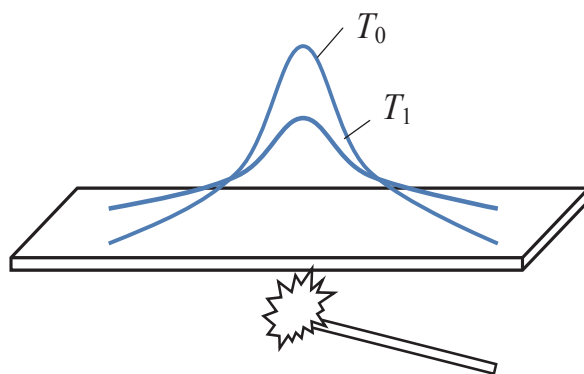


Рис. 2. Теплопроводящая пластина

Представим теперь, что вместо температур мы имеем дело с одномерным изображением и на кривых  $T_0$ ,  $T_1$  расположены не температуры, а яркости. Очевидно, что переход от кривой  $T_1$  к кривой  $T_0$  увеличивает контраст изображения, и представляется весьма заманчивым использовать это явление для реальных двумерных изображений. Это тем более заманчиво, потому что математика, описывающая процессы перехода от кривой  $T_1$  к кривой  $T_0$  и наоборот, хорошо известна – это уравнение теплопроводности [1].

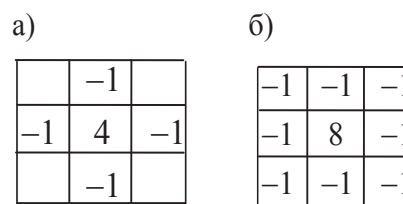


Рис. 1. Маски на основе лапласиана

Будем иметь цель повысить контраст на малых деталях изображения, обострить их. Рассмотрим на качественном уровне, как ведет себя процесс распространения тепла на плоскости. Для этого будем использовать такое географическое понятие, как вершина рельефа.

В прямом ходе времени пятно на изображении как участок с повышенной температурой, как вершина температурного (яркостного) рельефа расплывается, передавая тепло соседним участкам. Диаметр пятна увеличивается, амплитуда (в нашей трактовке – температура) уменьшается.

В обратном времени, наоборот, отбирается тепло от соседей (что физически быть не может), происходит обострение пятна, размер (диаметр) его уменьшается, амплитуда увеличивается, и это дает возможность предполагать, что на обычных изображениях на многих деталях будет увеличен локальный контраст.

Процесс распространения тепла на теплопроводящей поверхности описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2},$$

где  $t$  – время;  $T(x, y, t)$  – температура, она же яркость.

Решением этого уравнения является функция, представляющая распределение температуры на  $2D$  поверхности, зависящая от времени функция  $T(x, y, t)$ . Текущее изображение является начальным условием для решения вышеприведенного уравнения. То есть в момент  $T_0$  распределение температур дается функцией  $T_0(x, y, t)$ .

Не решая его, проанализируем даваемые им решения.

Горячее пятно на изображении представляет собой элемент температурного (яркостного) рельефа типа вершины. Известно, что на вершинах гор вторая производная (по  $x$  и по  $y$ ) всегда отрицательна, значит первая производная по  $t$  также отрицательна, и значит величина  $T$  уменьшается [2, 3]. Своеобразное температурное (яркостное) пятно – вершина рельефа – расплывается, передавая тепло соседним участкам. Диаметр пятна увеличивается, амплитуда (в нашей трактовке температура) уменьшается.

На физическом уровне можно говорить о том, что с того места, где есть вершина, тепло передается соседним участкам. В низинах, в ямах (в антигорах), наоборот, вторая производная (по  $x$  и  $y$ ) положительна, значит положительна первая производная по  $t$ , и значит величина  $T$  возрастает, получая тепло от своих соседей.

Возьмем изображение  $T_0(x, y)$  и будем полагать, что оно совпадает с распределением тепла на нашей теплопроводящей поверхности в начальный момент  $t = 0$ . Нас интересует, какое будет решение в момент  $t = \Delta t$ .

Для этого распишем в уравнении теплопроводности производную по времени в конечных разностях и обозначим сумму вторых производных буквой  $L$  (лапласиан)

$$\frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = L.$$

Тогда решение в момент  $\Delta t$  есть

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \Delta t \times L,$$

где  $L$  – лапласиан, который, будучи представлен на всем множестве  $(x, y)$ , является изображением, каждый пиксел которого равен сумме вторых производных по  $x$  и  $y$  у исходного изображения.

Квадратная форма пикселов (см. рис. 1) выделяет на изображении преимущественные направления, параллельные сторонам квадратов. Между тем лапласиан не должен иметь доминирующих направлений, должен быть максимально независим от них.

В настоящей работе предлагается для вычисления лапласиана использовать фигуры вращения, не имеющие доминирующих направлений. Для пояснения обратимся к рис. 3, на котором изображены границы пикселей и две concentric окружности с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ .

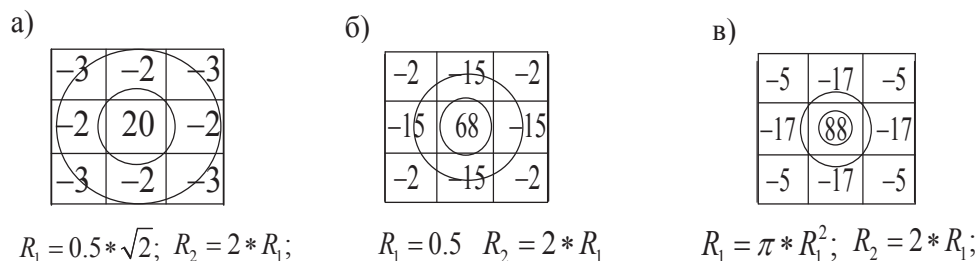


Рис. 3. Радиусы цилиндрических фигур

Сделаем из них объемные цилиндрические фигуры. Внутренняя окружность образует цилиндр, положим его высоту равной +1. Пространство между окружностями, превращаясь в фигуру вращения, будет кольцом, положим его высоту такой, чтобы объем этой фигуры был бы такой же, как у цилиндра, образованного внутренним радиусом. Припишем этому объему знак «-». Далее, считаем площади пересечения этого цилиндра и кольца с квадратными пикселями и создаем веса у вновь образованной маски путем суммирования тех частей фигур вращения, которые пересекаются с пикселями. Суммирование площадей производится с учетом знаков, присвоенных объемам пространственных фигур.

На рис. 4 представлены маски разного размера в пикселях. Для маски какого-либо одного размера в пикселях существует некоторое множество масок с разными размерами в радиусах  $R_1$ .

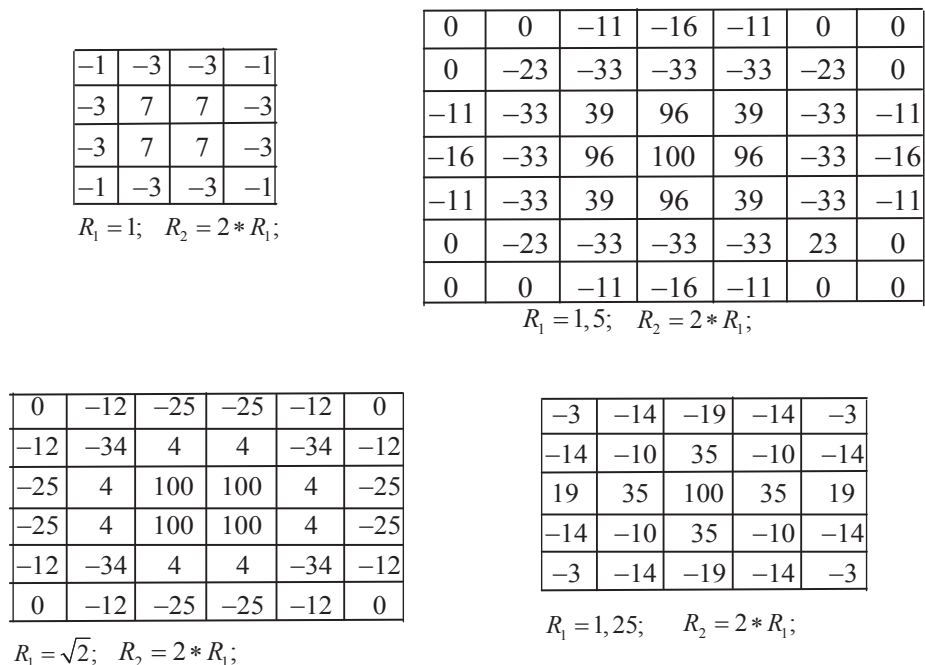


Рис. 4. Маски больших размеров

Стоит отметить, что размеры маски, обычно выбираемые как нечетные с наличием центрального элемента, не обязаны быть такими. На рис. 4 представлены в том числе и маски, у которых центром является квадрат пикселей размером  $2 \times 2$  элементов.

Представленные маски являются «сырыми», сумма всех элементов каждой маски равна нулю. Из уравнения теплопроводности видим, что результирующее изображение есть сумма двух

компонент и разобранные выше процедуры описали создание второго слагаемого. Для учета первого необходимо в центральный элемент маски добавить единицу или другое число.

В данном случае число в центре маски (или четверка чисел в случае четных размеров матрицы) является тем настроечным параметром, который выбирается экспериментально.

На рис. 4 представлены маски, сформированные на написанных выше соображениях.

На рис. 5 представлена пара изображений, представляющая результат действия одной маски

$$A = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -3 & -3 & -1 \\ -3 & 7 & 7 & -3 \\ -3 & 7 & 7 & -3 \\ -1 & -3 & -3 & -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{pmatrix},$$

а на рис. 6, соответственно, результат действия второй маски

$$B = \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -2 & -3 \\ -2 & 20 & -2 \\ -3 & -2 & -3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{pmatrix}.$$

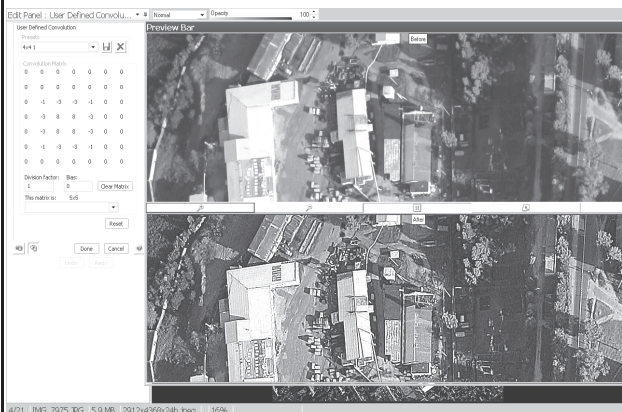


Рис. 5. Результат действия маски A



Рис. 6. Результат действия маски B

Следует заметить, что первоначальная гипотеза о том, что использование аналогии с процессами теплопроводности повышает контраст на малых деталях, оправдалась. Улучшается также восприятие линейных объектов, влияние шумов не увеличивается, что обычно бывает при попытках обострить изображение.

Наличие некоторого множества масок (см. рис. 4 – 5) требует введения некоторых рекомендаций по выбору конкретной маски для конкретного изображения. Наиболее эффективная рекомендация – экспериментальный подбор маски путем изменения ее размера, ее центрального элемента (или четырех центральных элементов).

Кроме того, при размерах маски, больше минимальных, обладают двумя противоположными свойствами: способностью обострять изображение на малых деталях и фильтровать малые детали путем частичного осреднения соседних элементов изображений.

Отметим следующее: расчет площадей пересечений фигур (цилиндр, кольцо, квадратные границы пикселей) доступен в САПР и в ГИС программах. Рассчитанная ими площадь будет представлена в плавающих числах с большим числом знаков. При окончательном формировании масок необходимо выбрать число значащих цифр и обязательно обеспечить нулевое суммарное значение для всего множества коэффициентов маски. Для масок, представленных на рис. 4 – 5,

выбирались одна или две значащих цифры, и потому для приближения по точности к законам передачи тепла (изотропная среда без доминирующих направлений) есть резервы.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 152 с.
2. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визельтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко [и др.]. – М.: Физматкнига, 2010. – С. 672.
3. Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Вильямс, 2004. – С. 926.



**Петрова А. Н., Чудин В. М.**

**A. N. Petrova, V. M. Chudin**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОНФИГУРАТОРА  
ДЛЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ ПЕРИФЕРИЙНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

**MODELING AND REALIZATION OF A UNIVERSAL CONFIGURATOR FOR DATA  
EXCHANGE BETWEEN PERIPHERAL DEVICES**

**Петрова Анна Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: petrovaan2006@yandex.ru.

**Mrs. Anna N. Petrova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Software and computer application, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: petrovaan2006@yandex.ru.

**Чудин Вячеслав Михайлович** – магистр Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: chudinvm@mail.ru.

**Mr. Vyacheslav M. Chudin** – Master's Degree Student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: chudinvm@mail.ru.

**Аннотация.** Для повышения скорости передачи данных или других целей разрабатываются новые или усовершенствуются существующие устройства передачи цифровой информации. Пакет данных для каждого из них индивидуален, и требуется создавать новое или корректировать имеющееся приложение в соответствии с измененным форматом пакета. Разработка программного обеспечения, которое можно настроить на обработку сообщений, не изменяя кода модулей в зависимости от структуры пакета данных, позволит ускорить процессы создания устройств передачи цифровой информации. В существующих приложениях не предусмотрена возможность настройки их под различные форматы сообщений данных. Авторами разработан математический аппарат для распознавания получаемых данных, на основе которого проведены математическое моделирование и реализация алгоритмов распознавания сообщений. В результате исследований разработаны конфигуратор и подсистема для обмена данными с периферийными устройствами. В работе приведены описания форматов пакетов данных и пример одного из конечных автоматов, используемых в приложении. В статье приводится схема взаимодействия модулей приложения с иллюстрацией деления на конфигуратор и подсистему обмена данными. В ходе исследований разработанное приложение было протестировано на различных устройствах, показало работоспособность и эксплуатируется в составе программно-аппаратного комплекса.

**Summary.** To improve the speed of data transmission or other purposes, new or advanced digital information transmission devices are being developed or improved. The data package for each of them is individual, and it is required to create a new one or adjust the existing application in accordance with the changed package format. The development of software that can be configured to process messages without modifying the code of modules, depending on the structure of the data package, will speed up the creation of digital information transmission devices. In existing applications, it is not possible to configure them for different data message formats. The authors developed a mathematical apparatus for recognizing the data obtained, based on which mathematical modeling and implementation of message recognition algorithms were carried out. Because of the research, a configurator and a subsystem for data exchange with peripheral devices were developed. The paper describes the formats of data packets and an example of one of the finite automata used in the application. The article provides a diagram of the interaction of application modules, with an illustration of the division into a configurator and a data exchange subsystem. In the course of the research, the developed application was tested on various devices and showed the operability and is operated as part of the hardware and software complex.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, разбор сообщения, обмен данными, информационная система, конфигурирование приложения.

**Key words:** mathematical modeling, message parsing, data exchange, information system, application configuration.

УДК 004.9

### **Введение**

Исследования в области сетевых протоколов ведутся с целью повышения скорости передачи данных. Предлагаемые способы можно разделить на программные и технические. Первые заключаются в математическом моделировании и настройке существующих протоколов [1-3; 11-13]. В статье «Исследование и оптимизация настройки протокола TCP/IP в сетях передачи данных» проводится исследование протокола TCP/IP и возможность настройки его параметров, таких как скорость передачи данных и выбор канала для передачи данных.

Исследование в статье «Математическая модель процесса информационного обмена по протоколу TCP» велось в том же направлении, при этом было рассмотрено моделирование процесса обмена данными и настройка протокола.

В статье «Обработка результата парсинга» анализируется процесс разбора сообщений в фреймворке Nitra. После предварительной настройки с помощью деклараций и правил грамматики фреймворк Nitra позволяет извлекать из исходного текста необходимые значения.

Вторые – в изобретении новых устройств, способствующих повышению скорости передачи данных [4-8]. Например, «Универсальный двунаправленный последовательный интерфейс передачи данных» позволяет соединять между собой периферийные устройства различных типов и производить между ними обмен последовательными данными.

Однако при разработке устройств, общающихся по этому протоколу, каждый раз необходимо писать приложение, с помощью которого происходил бы обмен данными с устройством. Более того, при внесении изменений в протокол необходимо изменять код программы, что отнимает много времени у разработчика устройства.

Вследствие этого перед авторами была поставлена задача разработать приложение, которое может настраиваться на протоколы, созданные разработчиком устройств, что значительно сократило бы время на тестирование и внедрение устройства.

### **Математическое моделирование**

В статье описана математическая модель для декодирования передаваемых сообщений по протоколам стандарта RS-232 и реализация ее в приложении, с помощью которого пользователь может обмениваться данными с устройствами, настроившись на соответствующий протокол.

В результате анализа стандарта RS-232 было определено, что при последовательной передаче данные передаются непрерывным потоком байтов. Поэтому для извлечения информации необходимо, во-первых, разбить исходный поток на пакеты данных, относящиеся к каждому устройству.

Структура пакета данных определяется форматом протокола обмена данными, созданного разработчиком устройства. Авторами предлагается следующая математическая модель, описывающая формат пакета протокола:

$$PR = \{T, V, E\},$$

где T – заголовок пакета; E – конец пакета; V – список значений параметров устройства;

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\},$$

где  $V_i$  – значение параметра i-го устройства.

В общем виде процесс считывания пакета данных и разбиения его на параметры показан на рис. 1. Сначала определяются начало и конец пакета данных, затем пакет данных проверяется на исключительные ситуации, и с помощью конечных автоматов для каждого параметра определяется его тип и вычисляется его значение.

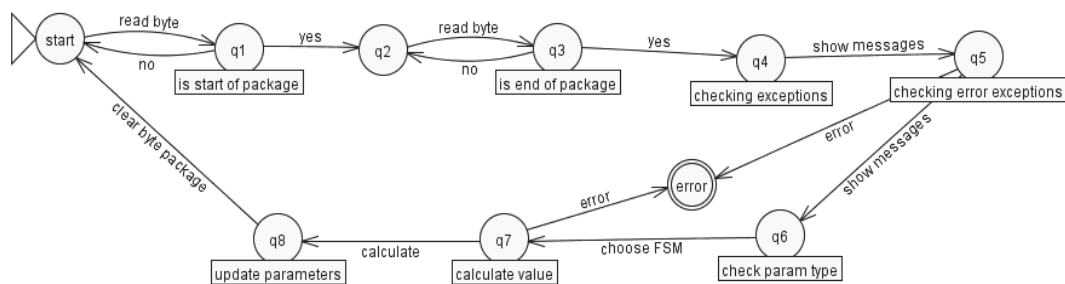


Рис. 1. Диаграмма процесса считывания параметров

При описании каждого параметра необходимо указать его название, тип, расположение в пакете данных, диапазон принимаемых значений и поясняющий комментарий. В общем виде описание параметра устройства имеет вид

$$P = \{N, T, B, C, L, M, K\},$$

где  $P$  – параметр устройства;  $N$  – имя параметра;  $T$  – тип параметра;  $B$  – номер байта, с которого начинается параметр пакета;  $C$  – количество байт, необходимых для хранения значения параметра пакета;  $L$  – минимально возможное значение;  $M$  – максимально возможное значение;  $K$  – комментарий.

Таким образом, значение параметра должно быть задано на отрезке

$$V_i \in [L_i, M_i].$$

При разборе входных сообщений необходимо идентифицировать и вычислить значение каждого параметра.

В качестве алгоритма разбора возможного значения используется конечный автомат Мили, который определяется в зависимости от типа параметра:

$$A_T = (S, X, Y, \delta, \lambda, S_0),$$

где  $A_T$  – автомат Мили;  $T$  – тип конечного автомата;  $S$  – конечное непустое множество состояний автомата;  $X$  – конечное непустое множество входных символов;  $Y$  – конечное непустое множество выходных символов;  $\delta$  – функция переходов, отображающая пары состояние/входной символ на соответствующее следующее состояние;  $\lambda$  – функция выходов, отображающая пары состояние/входной символ на соответствующий выходной символ;  $S_0$  – начальное состояние.

В качестве тестового примера ниже рассмотрен конечный автомат для распознавания значения байта, диаграмма переходов которого приведена на рис. 2.

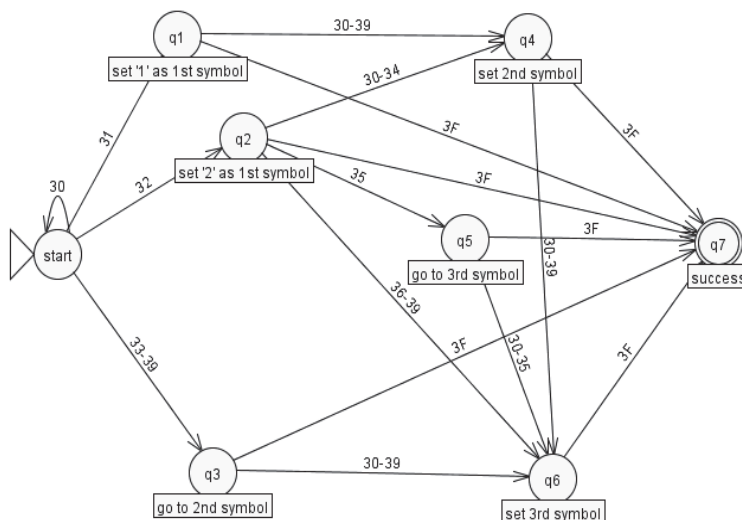


Рис. 2. Конечный автомат для распознавания значения байта

За один такт работы автомат получает один байт, значения которого варьируется от 00 до FF. Эти значения указаны на дугах диаграммы переходов конечного автомата.

В некоторых исключительных ситуациях в пакетах данных могут появляться ошибки (например, если были приняты пакеты данных от другого устройства). Чтобы отсеять эти пакеты данных и сообщить пользователю об ошибке, в приложении можно настроить обработку исключительных ситуаций (SP), срабатывающую при приеме таких пакетов данных. Для этого необходимо указать текст и тип выдаваемого сообщения, номер байта пришедшего пакета данных, и значение, при котором будет выдаваться сообщение

$$SP = \{Ms, Cs, Ts, Ns, Vs\},$$

где Ms – текст сообщения; Cs – комментарий; Ts – тип сообщения (простое сообщение, ошибка или пропуск пакета); Ns – номер проверяемого байта; Vs – значение байта, при котором выдается сообщение.

### Программная реализация

Разработанные математические модели были реализованы в приложении «Программа-конфигуратор для настройки приложения обмена данными по последовательным протоколам».

Приложение делится на две части: конфигуратор, настраивающий пользовательскую часть для передачи и преобразования данных через конфигурационные файлы, и пользовательская подсистема для отправки и принятия пакетов данных [9].

Схема вызова модулей приложения показана на рис. 3. Главная форма относится к пользовательской подсистеме [10], остальные модули – к конфигуратору.

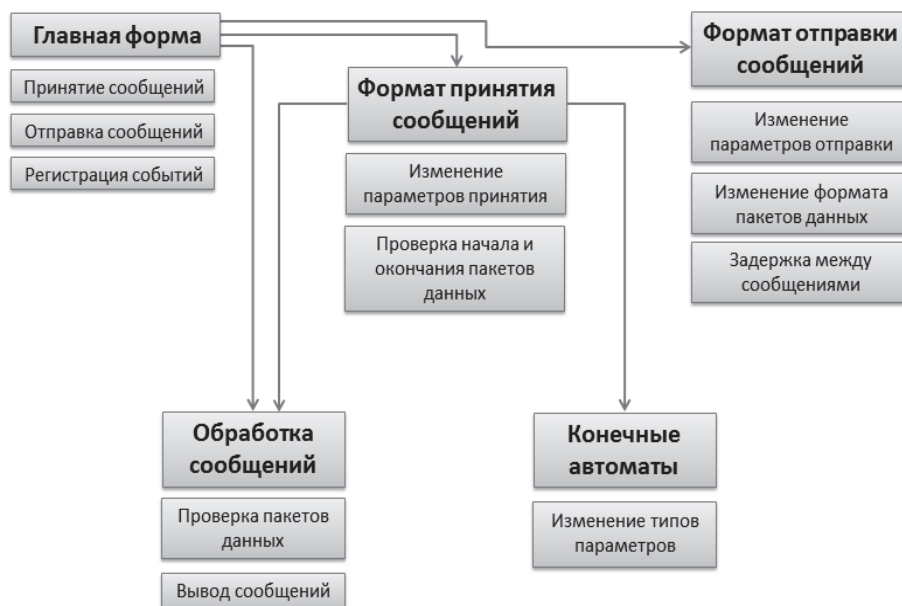


Рис. 3. Схема вызова модулей

В модуле конфигурации при настройке пакета данных необходимо указать признаки заголовка и конца пакета и список параметров устройства. Также следует ввести таблицу переходов конечного автомата для каждого типа параметра, и список исключительных ситуаций для приходящих пакетов данных. Для отправляемых же пакетов данных следует настроить те параметры устройства, которые будут в пакете данных, и формат сообщения.

В пользовательском приложении для обмена данными при загрузке происходит считывание конфигурационных файлов, а затем с разницей в 10 миллисекунд считываются прибывшие пакеты данных, каждый из которых проверяется на наличие заголовка и конца пакета. При этом

происходит проверка на исключительные ситуации и разбор параметров при помощи конечных автоматов.

### Практические результаты

В качестве аналогов приложения можно указать программы «Serial Data Logger» и «Datacol», которые обрабатывают получаемые с порта данные и сохраняют их в файлы формата, указываемого пользователем. Недостатком программ является невозможность настройки форматов принятия и отправки сообщений.

Были проведены тестовые испытания разработанного приложения на микроконтроллере «Wireless Plained ZigBit» и микросхеме «Arduino Nano». Тестирование подтвердило работоспособность программы и показало, что приложение может работать и для других программно-аппаратных компонентов.

Приложение внедрено в эксплуатацию в составе программно-аппаратного комплекса системы «SmartLight», включающей в себя более 60 осветительных устройств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гадышев, В. А. Математическая модель информационного обмена в сетях передачи данных / В. А. Гадышев, А. С. Крутолапов, Д. А. Сычев // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2012. – № 1(2). – С. 14-17.
2. Климов, И. З. Математическая модель системы передачи данных по электросетям / И. З. Климов, В. А. Мошонкин, А. Л. Шишкин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2-20. – С. 22-25.
3. Милюткин, М. Г. Проблемы современных протоколов маршрутизации и методика создания гибких протоколов / М. Г. Милюткин, Д. Ю. Полукаров // Проблемы автоматизации и управления в технических системах. – 2013. – С. 386-388.
4. Пат. 2145729 Российская Федерация, МПК 7G 06F 15/17 А. Способ передачи и приема асинхронных последовательных данных в цифровом процессоре сигналов / Джин-Син Ко; заявитель и патентообладатель Самсунг Электроникс Ко., Лтд. № 98103524/09; заявл. 19.02.98; опубл. 2000.
5. Пат. 2225028 Российская Федерация, МПК 7G 06F 13/40 А. Схема интерфейса и способ передачи данных между последовательным интерфейсом и процессором / Клоза К., Хоффманн Х.; заявитель и патентообладатель Инфинеон Текнолоджиз АГ (DE). № 2001106622/09; заявл. 05.08.99; опубл. 2004.
6. Пат. 2238613 Российская Федерация, МПК 7H 04L 5/16 А. Устройство приема и передачи асинхронных последовательных данных / Денисьев Б. Н., Бандурин Д. Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры "Прогресс". № 2002114687/09; заявл. 05.06.02; опубл. 2004.
7. Пат. 2292116 Российская Федерация, МПК H 04 B 7/08. Способ и устройство обработки данных в системе связи с множеством входов и множеством выходов (MIMO) с использованием информации о состоянии канала / Уолтон. Д. Р., Уоллэйс М. А., Кетчам Д. У., Ховард С. Д.; заявитель и патентообладатель Квэлкомм Инкорпорейтед. № 2003135853/09; заявл. 07.05.02; опубл. 2007.
8. Пат. 2345401 Российская Федерация, МПК G 06 F 3/00. Универсальный двунаправленный последовательный интерфейс передачи данных и способ передачи данных / Ксиньюн В., Ёнлин К.; заявитель и патентообладатель Циньхуа Университи. № 2006113760/09; заявл. 03.08.04; опубл. 2009.
9. Петрова, А. Н. Функциональные требования к программному обеспечению для системы управления освещением / А. Н. Петрова, В. М. Чудин // Научный альманах. – 2016. – № 5-3(19). – С. 138-141.
10. Свидетельство № 2016615848 Российская Федерация. Программа приложения для удаленного контроля системы освещения SmartLight: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В. М. Чудин, А. Н. Петрова, Д. А. Киба; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». № 2016615848; заявл. 05.04.2016; зарегистр. 01.06.2016. – 1 с.
11. Тимошина, М. М. Исследование и оптимизация настройки протокола TCP/IP в сетях передачи данных / М. М. Тимошина // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – № 2-11. – С. 39-42.
12. Тоискин, В. Е. Математическая модель процесса информационного обмена по протоколу TCP / В. Е. Тоискин, С. Н. Шиманов, В. А. Цимбал // Электросвязь. – 2015. – № 11. – С. 53-58.
13. Чистяков, В. Ю. Обработка результата парсинга / В. Ю. Чистяков // RSDN Magazine. – 2014. – № 1. – С. 47-54.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА  
MATHEMATICS AND MECHANICS

**Смагин В. А., Гусеница Я. Н., Шерстобитов С. А.**  
**V. A. Smagin, Ya. N. Gusenitsa, S. A. Sherstobitov**

**МОДЕЛЬ ДВУМЕРНОЙ ФУНКЦИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ  
ПРИ НАЛИЧИИ КОРРЕЛЯЦИИ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ**

**MODEL OF TWO-DIMENSIONAL MEMBERSHIP FUNCTION  
IN CASE OF PROPERTY CORRELATION OF THE SYSTEM**

**Смагин Владимир Александрович** – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: va\_smagin@mail.ru.

**Mr. Vladimir A. Smagin** – Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Faculty of Metrological Maintenance of Arms, Military and Special Equipment, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St.Petersburg). E-mail: va\_smagin@mail.ru.

**Гусеница Ярослав Николаевич** – кандидат технических наук, преподаватель кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: yaromir226@mail.ru.

**Mr. Yaroslav N. Gusenitsa** – PhD in Technical Sciences, Teacher of Faculty of Metrological Maintenance of Arms, Military and Special Equipment, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky (Russia, St.Petersburg). E-mail: yaromir226@mail.ru.

**Шерстобитов Сергей Александрович** – адъюнкт кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: radosti\_yad@mail.ru.

**Mr. Sergey A. Sherstobitov** – Post-graduate Student, Faculty of Metrological Maintenance of Arms, Military and Special Equipment, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky (Russia, St.Petersburg). E-mail: radosti\_yad@mail.ru.

**Аннотация.** В работе представлена модель двумерной функции принадлежности при наличии корреляции свойств системы. На конкретном примере описан метод построения двумерного элемента функции принадлежности с учётом коэффициента корреляции, корреляционной объёмной функции принадлежности при наличии двух свойств системы, множества значений корреляций объёмной функции принадлежности и направлений. Даны рекомендации для дальнейших исследований вопросов повышения точности построения объёмной функции принадлежности. Приведен пример построения опорной матрицы корреляционной объёмной функции принадлежности. В заключении определена практическая значимость разработанной модели. Подробно описаны задачи в сфере обороны и безопасности, для которых может быть использована модель двумерной функции принадлежности при наличии корреляции свойств системы.

**Summary.** The paper presents a model of a two-dimensional membership function in case of system property correlation. A concrete example describes a method for constructing a two-dimensional element of the membership function, taking into account the correlation coefficient, the correlation volumetric membership function in case of two properties of the system, the set of correlation values of the volumetric membership function and directions. Recommendations are given for further research on improving the accuracy of constructing a volumetric membership function. An example is given of constructing a support matrix for the correlation volume membership function. In conclusion, the practical significance of the developed model is determined. The tasks in the field of defense and security are described in detail, for which a model of the two-dimensional membership function can be used in case of a correlation of the properties of the system.

**Ключевые слова:** модель, корреляция свойств, опорная матрица, двумерная функция принадлежности.

**Key words:** model, correlation properties, support matrix, two-dimensional membership function.

УДК 510.22

## Введение

В некоторых исследованиях прикладного характера с использованием аппарата теории нечетких множеств иногда приходится сталкиваться с ситуацией, когда функции принадлежности являются многомерными. При этом принимаемые в исследованиях различные свойства системы оказываются взаимно коррелированными. Вопросу использования и исследования двумерных функций принадлежности посвящено ряд работ [1 – 6]. Вместе с тем в указанных работах не достаточно освещен вопрос методам и моделям построения двумерной функции принадлежности с учетом корреляции свойств системы. Поэтому целью данной статьи является разработка модели двумерной функции принадлежности при наличии корреляции свойств системы.

## Построение двумерного элемента функции принадлежности с учётом коэффициента корреляции

Сначала рассмотрим пример элемента с одним свойством. Пусть свойство элемента описывается нормальным распределением с плотностью вероятности  $f(x)$  с параметрами  $m = 20$  [ед.],  $\sigma = 5$  [ед.]. Максимум плотности равен  $\max f(20) = 0,08$  [ед.]<sup>-1</sup>. Тогда единичное значение функции принадлежности в точке максимума будет равно

$$Fp(20) = \frac{\max f(20)}{0,08} = 1.$$

Элементарное графическое представление функций  $f(x)$  и  $Fp(x)$  показано на рис. 1.

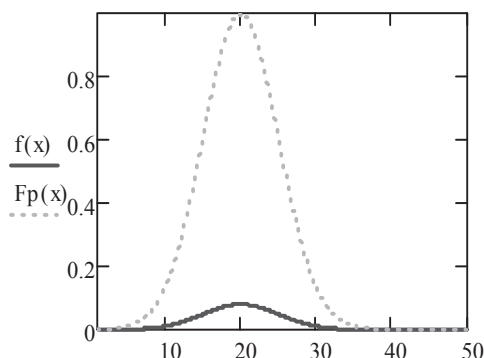


Рис. 1. Графическое представление функций  $f(x)$  и  $Fp(x)$

При  $\sigma \rightarrow 0$  приходим к дельта-функции элемента функции принадлежности.

Рассмотрим элемент с двумя свойствами. Пусть оба свойства описываются нормальной двумерной плотностью вероятности с корреляционной зависимостью

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} e^{\frac{-1}{2(1-r^2)} \left( \frac{(x-a_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(y-a_2)^2}{2\sigma_2^2} - 2r \frac{(x-a_1)(y-a_2)}{\sigma_1\sigma_2} \right)}. \quad (1)$$

Примем следующие значения параметров в (1):

$$a_1 = 20 \text{ [ед.]}, \sigma_1 = 0,2 \text{ [ед.]}, a_2 = 30 \text{ [ед.]}, \\ \sigma_2 = 0,2 \text{ [ед.]}, r = 0 \text{ [ед.]}$$

Затем представим (1) в дискретном виде

$$i = 0, 1 \dots 40; j = 0, 1 \dots 60; x_i = i; y_j = j; f_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} e^{\frac{-1}{2(1-r^2)} \left( \frac{(x_i-a_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(y_j-a_2)^2}{2\sigma_2^2} - 2r \frac{(x_i-a_1)(y_j-a_2)}{\sigma_1\sigma_2} \right)}.$$

Определим максимальное значение плотности вероятности  $\max f_{20,30} = 3,979$  [ед.]

Введём нормирующее значение для функции принадлежности по формуле  $g_{i,j} = \frac{f_{i,j}}{3,979}$  и определим максимальное значение функции принадлежности в данной точке, равное  $\max g_{20,30} = 1$ .

Изменяя значение коэффициента корреляции  $0 \leq r \leq 1$ , можно корректировать и величину других ординат двумерной функции принадлежности.

На рис. 2 – 3 представлены изображения двумерной функции плотности вероятности и двумерного элемента функции принадлежности для указанных выше исходных числовых данных.

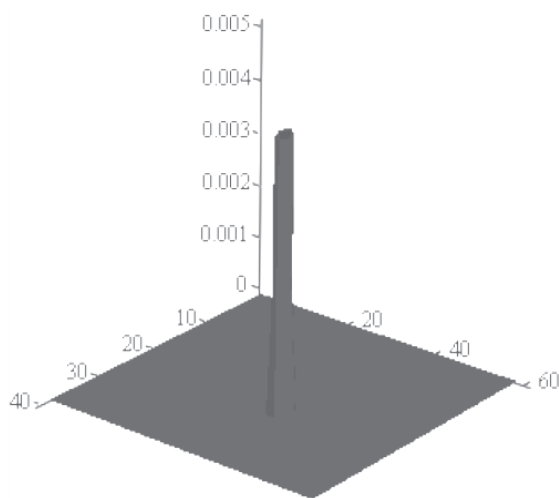


Рис. 2. Графическое представление двумерной функции плотности вероятности

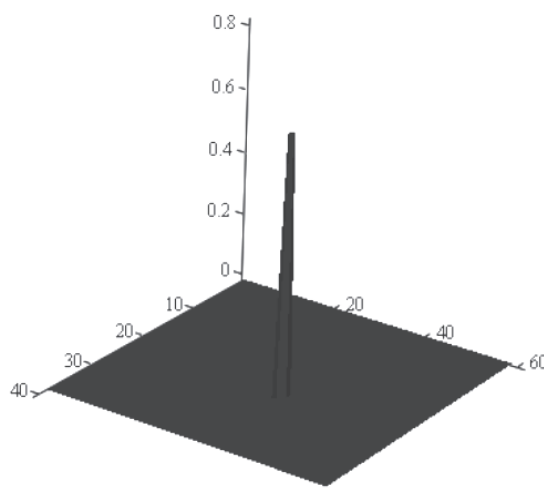


Рис. 3. Графическое представление двумерного элемента функции принадлежности

**Модель корреляционной объёмной функции принадлежности при наличии двух свойств системы**

В области задания лингвистических переменных функции принадлежности по оси абсцисс  $x$  и по оси ординат  $y$  выделим число  $n$ , равное числу лингвистических переменных. Длина  $i$ -го участка на оси  $x$  равна  $l$  единиц, а длина  $j$ -го участка на оси  $y$  равна  $h$  единиц. Таким образом, вся плоскость задания значений свойств лингвистических переменных будет поделена на одинаковые прямоугольники  $ij$  площадью  $lh$ , показанного на рис. 4.

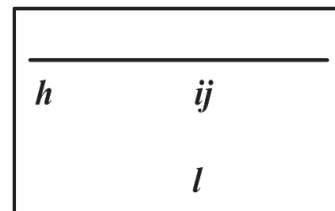


Рис. 4. Графическое представление

Далее, располагая информацией о двумерном распределении случайной величины двух свойств, соответствующей  $ij$ -й лингвистической переменной, можно найти величину значения функции принадлежности в центре прямоугольника с заданным коэффициентом корреляции. Например, пусть функция плотности вероятности для данного прямоугольника принимает вид

$$a_{ij}(x, y) = \frac{C_{ij}}{2\pi\sigma_i\sigma_j} e^{-\frac{1}{2(1-r_{ij}^2)} \left( \frac{(x-a_i)^2}{2\sigma_i^2} + \frac{(y-a_j)^2}{2\sigma_j^2} - 2r_{ij} \frac{(x-a_i)(y-a_j)}{\sigma_i\sigma_j} \right)}$$

где локальные  $C_{ij}$  – константы нормирования плотностей вероятности;  $a_i = \frac{(2i-1)l}{2}$ ,  $i=1,2,\dots$ ,  $a_j = \frac{(2j-1)h}{2}$ ,  $j=1,2,\dots$  – математические ожидания;  $\sigma_i, \sigma_j$  – среднеквадратические отклонения;  $r_{ij}$  – коэффициенты корреляции лингвистических переменных прямоугольников.

Произведя вычисления для всех прямоугольников площади задания лингвистических переменных, можно построить множество значений корреляций объёмной функции принадлежности.

Это множество значений следует считать опорным для построения непрерывной двумерной функции принадлежности. Вопросы точности построения здесь не рассматриваются. Только отметим, что точность построения будет определяться точностью исходной информации о лингвистических переменных, способом разбиения области задания на прямоугольники и методом сглаживания между собой опорных корреляционных значений между собой.

### Пример построения опорной матрицы корреляционной объёмной функции принадлежности

Предположим, что мы обладаем следующими исходными данными о свойствах системы: двумерная плотность вероятности свойств лингвистических переменных

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{(x-a)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-b)^2}{\sigma_2^2} - 2r\frac{(x-a)(y-b)}{\sigma_1\sigma_2}\right)}$$

с параметрами  $a = 20; 40; 60$ [ед.];  $b = 30; 69; 90$ [ед.];  $\sigma_1 = 0,1$ [ед.];  $\sigma_2 = 0,1$ [ед.];  $r \in [0,1]$ ; предельное значение для  $r = 1 - 10^{-16}$ .

В дискретном виде запишем:  $i = 0,1..4$ ;  $j = 0,1..5$ ;  $x_i = i$ ;  $y_j = j$ ;  $a_i = 20i$ ;  $b_j = 30j$

$$f_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-r^2}} e^{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{(x_i-a_i)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y_j-b_j)^2}{\sigma_2^2} - 2r\frac{(x_i-a_i)(y_j-b_j)}{\sigma_1\sigma_2}\right)}$$

В дальнейшем вычислим элементы матрицы из шести столбцов, в каждом из которых содержится по пять численных значений, применив оператор  $f \rightarrow A$ . Затем преобразуем матрицу  $A$

в матрицу  $\frac{f}{f_{i,j}} \cdot X Y$

Предполагая несколько различных значений коэффициента корреляции, например, 0; 0,3; 0,5; 1 и, изменив их нумерацию, запишем элементы матрицы в следующем виде:

$$\begin{aligned} r_{0,0} &= 0; & r_{0,1} &= 0; & r_{0,2} &= 0; & r_{0,3} &= 0; & r_{0,4} &= 0; & r_{0,5} &= 0; \\ r_{1,0} &= 0; & r_{1,1} &= 0,3; & r_{1,2} &= 0,3; & r_{1,3} &= 0,3; & r_{1,4} &= 0,3; & r_{1,5} &= 0; \\ r_{2,0} &= 0; & r_{2,1} &= 0,5; & r_{2,2} &= 1; & r_{2,3} &= 1; & r_{2,4} &= 0,5; & r_{2,5} &= 0; \\ r_{3,0} &= 0; & r_{3,1} &= 0,5; & r_{3,2} &= 1; & r_{3,3} &= 1; & r_{3,4} &= 0,5; & r_{3,5} &= 0; \\ r_{4,0} &= 0; & r_{4,1} &= 0; & r_{4,2} &= 0; & r_{4,3} &= 0; & r_{4,4} &= 0; & r_{4,5} &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Далее представим (2) в виде матрицы:

$$r = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 & 1 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 & 1 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

служащей матрицей для построения опорной двумерной функции принадлежности с учётом взаимной корреляции свойств лингвистических переменных. Опорная двумерная функция принадлежности для матрицы (2) представлена на рис. 5.

Если необходимо плавное изображение соединений в виде рёбер между узлами функции принадлежности, то нужно выполнить сглаживание известными методами.

### Заключение

В настоящей работе представлена модель двумерной функции принадлежности при наличии корреляции свойств системы. Данная модель может найти самое широкое применение в различных сферах деятельности человека, в том числе и в области обороны и безопасности. В частности, представленная модель может быть использована для исследования взаимосвязи различных видов, форм и способов действий подразделений, воинских частей и соединений самостоятельно, в составе разнородной группировки войск и во взаимодействии друг с другом с учётом влияния на них новых и перспективных средств вооружённой борьбы и других факторов оперативной (тактической) обстановки, обоснования эксплуатационно-технических, эргономических и эстетических характеристик вооружения, военной и специальной техники, разработки требований к уровню их работоспособности, боеготовности, боеспособности, безопасности, жизнеобеспечения личного состава, исследование влияния эксплуатационных свойств, живучести вооружения, военной и специальной техники, воздействия среды, эксплуатационных, поражающих и других факторов на эффективность образцов, комплексов, систем, группировок вооружения, военной и специальной техники, а также решения многих других задач системного анализа, исследования операций, теории эффективности, информатики, кибернетики, искусственного интеллекта, принятия решений применительно к военной области.

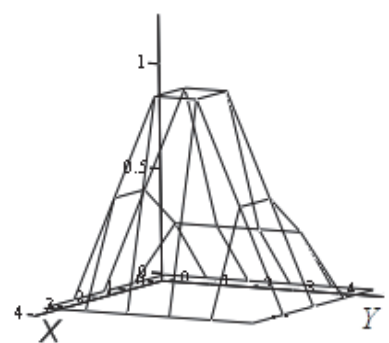


Рис. 5. Графическое представление двумерной функции принадлежности

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аблеков, В. К. Построение математической модели системы обнаружения мошенничества в системах дистанционного банковского обслуживания / В. К. Аблеков, А. А. Краснопевцев, А. В. Мамаев // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2013. – Т. 2. – № 3. – С. 326-333.
2. Блюмин, С. Л. Реализация программного комплекса для настройки и последующей работы с разностными нейронечеткими переключаемыми моделями / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, Н. Ю. Жбанова // Вестник ТГУ. – Т. 19. – Вып. 2. – 2014. – С. 341-348.
3. Груздо, И. В. Технология оценивания текстовых работ студентов вузов в аспекте наличия в них плагиата / И. В. Груздо // Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2012. – Вып. 9 (107). – С. 280-285.
4. Гуламов, М. И. Об одном обобщении определения экологической ниши Хатчинсона / М. И. Гуламов, А. Т. Терехин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2004. – № 1. – С. 19-26.
5. Ковалев, С. М. Упреждающее онлайн-распознавание нечетких темпоральных паттернов в потоковых данных / С. М. Ковалев, В. П. Терновой // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: теория и практика: материалы 1-го Междунар. симпозиума. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2012. – С. 364-375.
6. Коньшева, Л. К. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие / Л. К. Коньшева. – СПб.: Питер, 2011. – 192 с.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

**Сикачина А. А.**  
**A. A. Sikachina**

### **УРЕИДЫ КАК ИНГИБИТОРЫ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ СТАЛИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ АДСОРБЦИИ**

### **UREIDS AS INHIBITORS OF MICROBIOLOGICAL CORROSION OF STEEL: PROCESS OF ADSORPTION MODELLING**

**Сикачина Андрей Анатольевич** – инженер-лаборант кафедры химии, аспирант Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (Россия, Калининград). E-mail: sikachin@list.ru.

**Mr. Andrey A. Sikachina** – Federal state Autonomous educational institution of higher professional education Immanuel Kant Baltic Federal University (Russia, Kaliningrad-city). E-mail: sikachin@list.ru.

**Аннотация.** В статье представлен смоделированный при помощи квантово-химического пакета HyperChem версии 8.0.7, при помощи полуэмпирического метода ZINDO/1 процесс адсорбции органических соединений класса уреидов, начиная от простого и кончая более сложным, на кластере железа (имеющегося в данном виде стали в количестве 97 %). Такой подход, как будет показано далее, с высокой точностью отражает процесс защиты от коррозии с бактериальным контентом путем хемосорбции органического соединения на поверхности металла с образованием комплексного соединения. В процессе исследования были получены и проанализированы глобальные и локальные электрофильности гетероатомов, отражены составы полученных комплексов и их структурные параметры, изложен график, отображающий зависимость локальной электрофильности от защитного антикоррозийного эффекта (чем больше защитный эффект, тем меньше скорость коррозии).

**Summary.** In published work presents modeled using quantum chemical package HyperChem version 8.0.7 using the semiempirical method ZINDO/1, the process of adsorption of organic compounds of ureide ranging from simple to more complex, a cluster of iron (present in the steel in amounts of 97 %). This approach, as will be shown, with high accuracy reflects the process of corrosion protection with bacterial content by chemisorption of organic compounds on the metal surface with the formation of complex compounds. In the research process were obtained and analyzed global and local electrophilicity heteroatoms, reflects the composition of the complexes, lit a graph showing the dependence of the local electrophilicity from protective anti-corrosion effect.

**Ключевые слова:** HyperChem, уреиды, защитный эффект, сульфатредуцирующие бактерии, адсорбция, сталь 3, железо, электрофильность.

**Key words:** HyperChem, ureide, the protective effect of, sulphate-reducing bacteria, adsorption, steel St3, iron, electrophilicity.

УДК 627.257:621.3.035.221.727:621.315.617.1

#### **Введение**

Экономический и экологический ущерб от коррозии в промышленности связан с большой металлоемкостью оборудования и наличием высоко агрессивных сред [3]. Эффективным методом защиты в подобных средах является применение ингибиторов коррозии [6], синтез новых форм которых непрерывно расширяется, поскольку ужесточаются требования промышленных компаний к высокой эффективности при малых концентрациях (100...200 мг/л). Естественно, это снижает себестоимость противокоррозионной защиты, повышает конкурентоспособность и уменьшает экологическую нагрузку на окружающую среду. Данное исследование есть способствование развитию поиска органических соединений, способных выступать как ингибиторы коррозии, который в настоящее время ведется не столько путем скрининга, но и путем все большего вовлечения аспектов численного эксперимента, наиболее современные из которых – квантово-химическое моделирование адсорбции органического соединения на металле [5].

**Актуальность исследования**

Поиск зависимости между защитным эффектом от коррозии и величинами квантово-химических дескрипторов адсорбционных комплексов, получающихся как продукты донорно-акцепторного взаимодействия органического соединения с атомами железа, что дает предсказательную базу для предварительных исследований органического соединения как ингибитора коррозии.

**Методика эксперимента**

Структурные формулы исследуемых уреидов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Структуры молекул исследованных ингибиторов и принятая автором нумерация предполагаемых центров адсорбции

Код ингибитора	Структурные формулы
<i>U1</i>	
<i>U2</i>	
<i>U3</i>	

Защитный эффект против микробиологической коррозии ( $Z$  %) представлен в табл. 2. Для сравнения в скобках отображены соответствующие скорости коррозии<sup>1</sup> [1; 2; 7].

Таблица 2

Защитные эффекты против сероводородной коррозии в присутствии сульфатредуцирующих бактерий, находившихся в закрытой системе в среде Постгейта с привнесенными концентрациями ингибиторов (по Колесниковой, 2004)

Код ингибитора	Концентрация ингибитора		
	$1 \text{ mmol} \times \text{dm}^{-3}$	$2 \text{ mmol} \times \text{dm}^{-3}$	$10 \text{ mmol} \times \text{dm}^{-3}$
	Защитный эффект, % (скорость коррозии, $\text{g} / (\text{m}^2 \times \text{day})$ )		
<i>U1</i>	20 (2,8)	29 (2,5)	34 (2,3)
<i>U2</i>	26 (2,6)	29 (2,5)	40 (2,1)
<i>U3</i>	43 (2,0)	54 (1,6)	71 (1,0)

<sup>1</sup> Величина защитного эффекта от коррозии обратно пропорциональна скорости таковой. Величина защитного эффекта вычисляется следующим образом:  $Z = (K_0 - K) / K_0$ , где  $K_0$  – скорость коррозии без ингибитора;  $K$  – скорость коррозии с ингибитором (эффект применения серии уреидов, добавляемых в коррозионную среду)

Численный эксперимент выполнялся при помощи квантово-химического пакета HyperChem версии 8.0.7, используя встроенные средства визуализации. Структура каждого из трех представителей уреидов (*U*) подготавливалась методом молекулярной механики MM+ (нахождение оптимальной конформации), затем применялся полуэмпирический метод AM/1, которым задавались базовая конфигурация соединения и набор квантово-химических дескрипторов электронной структуры.

Научная новизна проводимого исследования заключается в привлечении более информативного приближения донорно-акцепторного взаимодействия ОС с атомами железа (опорой и основанием послужили представления Льюиса, исходя из которых следует, что ОС есть основание Льюиса, а атом железа есть кислота Льюиса), для подобного расчета был применен полуэмпирический ZINDO/1 с предварительной оптимизацией методом OPLS (наиболее точно отражает нековалентные взаимодействия, при этом задаваемая исследователем двухмерная структура, состоящая из лежащей в одной плоскости молекулы ингибитора и атомов железа, превращается в трехмерную). Программно вычислялись заряды на гетероатомах через анализ заселенностей Малликена, энергии граничных орбиталей<sup>2</sup>. Из них выводились глобальные и локальные величины электрофильности уреидов ( $\omega$ ). Локальные электрофильности вычислены вследствие симметричности соединений с предварительным суммированием зарядов на симметрично расположенных гетероатомах [4; 7].

Поскольку адсорбционные комплексы, полученные в результате адсорбционно-химического взаимодействия уреидов с атомами железа, смоделированного по апробируемому методу, имеют определенный структурный состав, ниже будут рассмотрены связи *Fe – атом структуры уреида*, при этом будут учтены связи с длиной, не превышающей 2,5 Å.

### Результаты и обсуждение

Простейшие формулы уреидов и полученных железосоединений представлены в табл. 3. Для сравнения приведены также формулы исходных веществ.

Таблица 3

Формулы железосоединений, уреидов

Код ингибитора	Формулы уреидов	Формулы комплексов уреидов
<i>U1</i>	$C_4H_4O_2N_2S$	$Fe_9 \leftarrow C_4H_4O_2N_2S$
<i>U2</i>	$C_4H_6O_2N_2S$	$Fe_8 \leftarrow C_4H_6O_2N_2S$
<i>U3</i>	$C_{14}H_{14}O_6N_2S$	$Fe_{14} \leftarrow C_{14}H_{14}O_6N_2S$

Донорные свойства гетероатомов отражены величинами глобальной и локальной электрофильности (рассмотрены только исходные ОС). Чем выше последние, тем большее участие принимают в целом уреиды (глобальный индекс электрофильности) и их атомы (локальный индекс электрофильности) в процессе адсорбции на поверхности металла (см. табл. 4).

Таблица 4

Величины глобальной электрофильности уреидов

Код ингибитора	глоб $\omega$ уреидов
<i>U1</i>	1,863
<i>U2</i>	1,767
<i>U3</i>	1,972

Из представленной табл. 4 очевидно, что электрофильность рассматриваемых соединений-уреидов падает в ряду *U3 – U1 – U2*. Здесь происходит падение количества электронов, могущих

<sup>2</sup> Автор не ставил цели отображения и рассмотрения программно вычисляемого контента

донироваться на поверхность металла, число кратных связей уменьшается, чем объяснимо уменьшение числа адсорбированных атомов железа при уменьшении количества сопряженных связей.

Локальная электрофильность напрямую зависит от процесса адсорбции. В табл. 5 отражены локальные величины электрофильности, обусловленные суммарными зарядами на симметрично расположенных атомах уреидного фрагмента ( $\omega_{\Sigma U \Delta q_E}$ ) и гидрохинонового ( $\omega_{\Sigma H \Delta q_E}$ ).

Таблица 5

Величины локальных электрофильностей гетероатомов структуры уреидов для реакции хемосорбционного комплексообразования

Код ингибитора	Локальные электрофильности, обуславливаемые зарядами на симметрично расположенных атомах			
	$\omega_{\Sigma U \Delta q_N}$	$\omega_{\Sigma U \Delta q_O}$	$\omega_U \Delta q_S$	$\omega_{\Sigma H \Delta q_O}$
<i>U1</i>	0,829	0,855	0,518	–
<i>U2</i>	0,811	0,768	0,247	–
<i>U3</i>	0,907	0,600	-0,574	0,305

В величину индекса локальной электрофильности (см. табл. 5) вносят вклад два явления: 1) собственно структура уреида, 2) величина глубины перехода электронной плотности по связям *Fe* – гетероатом, что определяется величиной функции Фукуи, которая сильнее, чем гетероатом осуществляет донорную активность на атом железа, снижая величину своего заряда (согласно уравнению  $\omega_{\text{лок}} \omega_{\text{гетероат}} = FF \times \omega_{\text{глоб}} = ((\omega_{\text{кон}} Q_{\text{гетероат}} - \omega_{\text{нач}} Q_{\text{гетероат}}) \times \omega_{\text{глоб}})$ ). Так, в *U1* распределение величин электрофильности такого типа следующее:  $\omega_{\Sigma U \Delta q_O} - \omega_{\Sigma U \Delta q_N} - \omega_U \Delta q_S$ , а в структурно подобном *U2* (а также в *U3*, включающем заместитель, присоединенный через «серный мостик») следующее:  $\omega_{\Sigma U \Delta q_N} - \omega_{\Sigma U \Delta q_O} - \omega_U \Delta q_S$ . В первом случае это можно объяснить наличием мезомерного эффекта во всей цепи (как в бензоле), и на атомы кислорода перетекает большая электронная плотность со всей молекулы. Далее, с атомов кислорода кетогрупп электронная плотность донируется на металл (величина *FF* наиболее высока, и, как следствие, высока  $\omega_{\Sigma U \Delta q_O}$ ). В *U2*, в отличие от *U1*, связь  $\text{}^5\text{C}-\text{}^6\text{C}$  является одинарной, и мезомерный эффект может проявляться лишь на части молекулы. Тогда решающее значение в процессе хемосорбции имеет атом азота как менее электроотрицательный, поэтому наиболее высока величина  $\omega_{\Sigma U \Delta q_N}$ , поскольку величина функции Фукуи велика в связи с сильным донированием на атом железа электронной плотности.

Указанная в молекуле *U2* последовательность сохраняется в молекуле *U3*. Снижение величины индекса локальной электрофильности здесь выражено наиболее резко. Атом же серы имеет отрицательную величину индекса  $\omega_U \Delta q_S$ . Как будет показано ниже, атом серы донирует свою электронную плотность и способствует оттоку последней с уреидного фрагмента на фрагмент гидрохинона. То же касается атомов  $\text{}^7\text{O}$  и  $\text{}^8\text{O}$ . Величины индексов локальной электрофильности крайне низки ( $\omega_U \Delta q_S = -0,574$  и  $\omega_{\Sigma H \Delta q_O} = 0,305$ ) – их участие в реакции  $a\text{Fe} + \text{OCY} = \text{Fe}_{a\leftarrow}(\text{OCY})$  является косвенным через взаимное влияние атомов в молекуле.

Судя по распределению локальной электрофильности, в молекуле *U3*, вероятнее всего, электронная плотность перетекает от заместителя (фрагмента гидрохинона) к основной цепи (уреидной), поскольку вычисленная  $\omega_{\Sigma H \Delta q_O}$  сильно понижена, что может быть в результате двух одновременных реакций: первая упомянута выше, а вторая – это нековалентное взаимодействие заместителя с атомами железа.

Зависимость между локальной электрофильностью атома серы ( $\omega_U \Delta q_S$  или короче  $\omega(S)$ ) и *Z* % представлена на рис. 1.

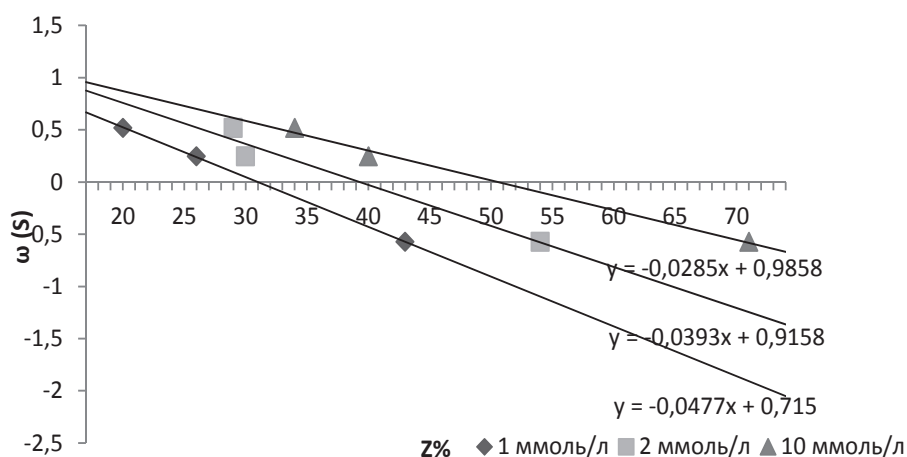


Рис. 1. Графическая зависимость вида  $\Sigma_U \Delta q_S - Z\%$  и соответствующие уравнения сгенерированных компьютером линий тренда

Согласно рис. 1 (со сгенерированными компьютером линейными линиями тренда, с приложенными уравнениями таковых) защитный эффект от коррозии растет тем больше, чем ниже  $\omega_U \Delta q_S$ . Данное явление проявляется, начиная с  $Z\% = 20$  при наименьшей взятой концентрации и кончая  $Z\% = 31$  и т.д. Электрофильность при этом должна уменьшаться (что доказывает участие этого атома в процессе хемосорбции). Чем меньше концентрация ингибитора, тем сильнее будет снижаться величина локальной электрофильности атома серы, что является залогом проявления высокого защитного эффекта. В случае возникновения  $Z\% = 31, 41, 51\%$   $\omega_U \Delta q_S$  есть нулевая величина. Это происходит, очевидно, потому, что атом серы практически не участвует в связи с атомами железа при указанных величинах  $Z\%$ . После же достижения  $Z\% = 31, 41, 51\%$  дальнейшее приращение такового может быть только при возрастании нуклеофильности атома серы, т.е. решающее значение в миссии ингибиторной защиты начинает иметь электросорбция.

Характеристика структуры донорно-акцепторных комплексов (на примере донорно-акцепторных связей) представлена в табл. 6 – 8.

Таблица 6

### Характеристика связей в соединении $Fe_9 \leftarrow C_4H_4O_2N_2S$

Заряд конкретного атома железа	Наименование связей с гетероатомами	Длина квантово-химически вычисленных связей, Å
-0,350	Fe- <sub>3</sub> O	2,43
	Fe- <sub>1</sub> N	2,31
-0,235	Fe- <sub>3</sub> O	2,14
-0,235	Fe- <sub>5</sub> C	2,49
	Fe- <sub>6</sub> C	2,41
-0,364	Fe- <sub>4</sub> O	2,38
-0,517	Fe- <sub>1</sub> N	2,25
	Fe- <sub>2</sub> N	2,39
-0,271	Fe- <sub>4</sub> O	2,34
-0,364	Fe- <sub>4</sub> O	2,38
	Fe- <sub>2</sub> N	2,45
-0,334	Fe-S	2,50
	Fe- <sub>2</sub> N	2,50
-0,154	Fe-S	2,50

Таблица 7

Характеристика связей в соединении  $\text{Fe}_8\leftarrow\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2\text{N}_2\text{S}$ 

Заряд конкретного атома железа	Наименование связей с гетероатомами	Длина квантово-химически вычисленных связей, Å
-0,427	Fe-S	2,50
	Fe- <sub>1</sub> N	2,47
	Fe- <sub>3</sub> O	2,38
-0,244	Fe- <sub>1</sub> N	2,50
-0,234	Fe- <sub>3</sub> O	2,20
-0,258	Fe- <sub>5</sub> C	2,40
	Fe- <sub>6</sub> C	2,42
-0,465	Fe- <sub>2</sub> N	2,34
	Fe- <sub>3</sub> O	2,38
-0,319	Fe- <sub>4</sub> O	2,16
-0,469	Fe- <sub>2</sub> N	2,50
	Fe- <sub>1</sub> N	2,25
	Fe- <sub>6</sub> C	2,40
-0,390	Fe- <sub>2</sub> N	2,40
	Fe-S	2,48

Таблица 8

Характеристика связей в соединении  $\text{Fe}_{14}\leftarrow\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{O}_6\text{N}_2\text{S}$ 

Заряд конкретного атома железа	Наименование связей с гетероатомами	Длина квантово-химически вычисленных связей, Å
-0,347	Fe- <sub>4</sub> O	2,17
	Fe- <sub>2</sub> N	2,29
-0,495	Fe- <sub>2</sub> N	2,41
	Fe- <sub>6</sub> C	2,41
-0,436	Fe- <sub>6</sub> C	2,50
	Fe- <sub>4</sub> O	2,15
-0,393	Fe- <sub>3</sub> O	2,28
	Fe- <sub>6</sub> C	2,41
	Fe- <sub>5</sub> C	2,50
-0,359	Fe- <sub>3</sub> O	2,29
-0,594	Fe- <sub>2</sub> N	2,39
	Fe- <sub>10</sub> O	2,36
-0,534	Fe- <sub>10</sub> O	2,45
	Fe- <sub>3</sub> O	2,50
	Fe- <sub>1</sub> N	2,47
-0,282	Fe- <sub>10</sub> O	2,50
	Fe- <sub>12</sub> CH <sub>3</sub>	2,46
-0,416	Fe- <sub>12</sub> CH <sub>3</sub>	2,52
	Fe- <sub>8</sub> O	2,26
	Fe- <sub>14</sub> C	2,46
-0,651	Fe- <sub>14</sub> C	2,50
	Fe- <sub>13</sub> C	2,38
-0,691	Fe- <sub>14</sub> C	2,35
	Fe- <sub>13</sub> C	2,40
	Fe- <sub>11</sub> CH <sub>3</sub>	2,45
-0,451	Fe- <sub>7</sub> O	2,26
	Fe- <sub>11</sub> CH <sub>3</sub>	2,42
-0,436	Fe- <sub>6</sub> C	2,50
	Fe- <sub>4</sub> O	2,15
-0,504	Fe- <sub>9</sub> O	2,21

В структуре  $Fe_9 \leftarrow C_4H_4O_2N_2S$  очевидно, что атом железа имеет координационное число в диапазоне I...II (см. табл. 5). Координационные числа, по-видимому, коррелируют с зарядами: при заряде на атоме железа большем  $-0,334$  есть наиболее высокие координационные числа. Наиболее коротки связи атома железа с амидным фрагментом, образуемым  ${}_3O$  и  ${}_1N$ . Дентатность по атомам кислорода кетогрупп равна V. Дентатность по атому азота равна V, по атому серы и углерода – II. Поэтому главный адсорбционный центр есть атом азота и атом кислорода кетогрупп.

В структуре  $Fe_8 \leftarrow C_4H_6O_2N_2S$  очевидно, что атом железа имеет координационное число в диапазоне I...III (см. табл. 6). Координационные числа, по-видимому, коррелируют с зарядами: при заряде на атоме железа большем  $-0,469$  есть наиболее высокие координационные числа. Наиболее коротки связи атомов железа с кислородом кетогрупп уреидного кольца (2,16...2,20 Å). Дентатность по атомам кислорода кетогрупп равна IV. Дентатность по атому азота равна VI, по атому серы II и углерода – III. Поэтому главный адсорбционный центр есть атом азота.

В структуре  $Fe_{14} \leftarrow C_{14}H_{14}O_6N_2S$  очевидно, что атом железа имеет координационное число в диапазоне I...III (см. табл. 7). Координационные числа, по-видимому, коррелируют с зарядами: при заряде на атоме железа большем  $-0,416$  есть наиболее высокие координационные числа. Наиболее коротки связи атомов железа с кислородом кетогрупп уреидного кольца (2,15...2,29 Å) и атомами кислорода ацетильного фрагмента (2,21...2,26 Å). Дентатность по атомам кислорода кетогрупп уреидного кольца равна V, по атомам кислорода кетогрупп ацетила – IV, по атомам фенольного кислорода равна II (вследствие донорования электронной плотности в бензольное кольцо, в связи с этим атом углерода бензольного кольца (связь  ${}_{7(8)}O-C$ ) имеет дентатность V). Дентатность по атому азота равна IV. Дентатность по метильным группам равна IV, дентатность по  ${}_5C$  и  ${}_6C$  есть V. Электронная плотность атома серы, в отличие от таковой на атомах серы  $U1$  и  $U2$ , крайне сильно делокализована на уреидное и ароматическое кольца, поэтому данный атом не принимает прямого участия в образовании связей Fe-S. Наличие большого количества центров адсорбции обуславливает очень высокий Z %.

Атомы  ${}_5C$  и  ${}_6C$  в ОС  $U1...U3$  имеют дентатность II...V (самая высокая приходится на  $U2$  и  $U3$ , где одинарна связь  ${}_5C-{}_6C$ ), поскольку атомы водорода при них обладают кислотными свойствами (влияние карбоксильных групп вместе с электроотрицательностью атомов азота в молекуле уреидов, представляющих из себя продукты конденсации тиомочевины и янтарной кислоты ( $U2$  и  $U3$ )) и при воздействии оснований способны давать анионы  $q$  центр. Основание (нуклеофильный агент) из системы *среда Постгейта* + СВБ будет способно элиминировать атомы H.

### Вывод

В результате исследования было выяснено, что примененный квантово-химический подход дает точную зависимость между локальной электрофильностью отдельно взятого атома и защитным эффектом от коррозии, что представляется ценным, поскольку полуэмпирический подход не требует существенных затрат ресурсов вычислительного кластера и времени. Таким же образом может быть исследовано поведение в этом аспекте других атомов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Beloglazov, G. S. Modelling macroscopic properties of organic species on the basis of quantum chemical analysis (on an example of inhibiting efficiency of ureides and acetylides against corrosion) [Electronic resource] / G. S. Beloglazov, A. A. Sikachina, S. M. Beloglazov // Solid State Phenomena. – 2014. – Vol. 225. – pp. 7-12. – URL: doi://10.4028/www.scientific.net/SSP.225.
2. Аббасов, В. М. Защита стали от сероводородной коррозии с применением бактерицидов / В. М. Аббасов, И. А. Мамедов, Е. М. Абдуллаев // Защита металлов. – 1995. – Т. 31 (№ 2). – С. 206-208.
3. Гориленко, Н. Н. Влияние коррозии стали на развитие смешанной культуры сульфатредукторов / Н. Н. Гориленко // Коррозия и защита металлов: межвузовский тематический сб. науч. тр. – Вып. 7. – Калининград, 1988.
4. Колесникова, Н. В. Влияние производных сульфаниламидов и уреидов на электроосаждение сплава Ni-Mn, его коррозию в присутствии сульфатредуцирующих бактерий и мицелиальных грибов и абсорбцию водорода: автореф. дис. ... канд. хим. наук / Н. В. Колесникова. – Калининград, 2004. – 17 с.

5. Дятлова, Н. М. Комплексоны и комплексонаты металлов / Н. М. Дятлова, В. Я. Темкина, К. И. Попов. – М.: Химия, 1988. – 544 с.
6. Электрохимические и биологические аспекты стабилизации процессов коррозии металлов в агрессивных средах / И. С. Погребова, Л. М. Пурин, И. А. Козлова [и др.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2000. – Т. 2. (№ 1). – С. 479-481.
7. Руководство к практическим занятиям по микробиологии / под ред. Н. С. Егорова. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – С. 95-191.
8. Сикачина, А. А. Анализ противомикробной активности аминополикарбонатов и аминополифосфонатов в среде модельной системы «дистиллированная вода / толуол» / А. А. Сикачина // Глобальный научный потенциал. – 2015. – № 5. – С. 212-218.
9. Сикачина, А. А. Комплексоны-полиаминополикарбонатовые кислоты: квантово-химическое и статистическое исследование молекул и их серий / А. А. Сикачина, С. М. Белоглазов // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 7.
10. Сикачина, А. А. Квантово-химическое моделирование реакции различных форм 2-аминопропановой кислоты с атомами железа / А. А. Сикачина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 6. – С. 102-106.



**Шаламов Р. В., Щетинин В. С.**

**R. V. Shalamov, V. S. Shchetinin**

## **ВНЕДРЕНИЕ ГАЗОМАГНИТНЫХ ОПОР В КОМПРЕССОРЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ**

## **INTRODUCTION OF GAS-MAGNETIC SUPPORTS TO COMPRESSORS OF GAS-TRANSMISTING-STATIONS**

**Шаламов Роман Валерьевич** – магистрант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: price.skyrim@mail.ru.

**Mr. Roman V. Shalamov** – Master' s Degree student, Machinery and equipment of chemical plants Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: price.skyrim@mail.ru.

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8(4217)241-134. E-mail: mahp@knastu.ru.

**Mr. Vladimir S. Shchetinin** – doctor of technical sciences, professor, Machinery and equipment of chemical plants Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8(4217)241-134. E-mail: mahp@knastu.ru.

**Аннотация.** В начале статьи рассмотрены опоры валов, которые в настоящее время массово используются в компрессорах газоперекачивающих станций. Далее, представлены результаты экспериментальных исследований высокоскоростных роторов на газомagnetных опорах. Для построения опытных характеристик жесткости и нагрузки на консоли вала в зависимости от различных величин была разработана методика исследования. Рассмотрены перспективы внедрения газомagnetных опор в компрессоры газоперекачивающих станций для обеспечения требуемых параметров быстроходности и надежности. Перечислены основные эксплуатационные характеристики, за которыми наблюдалось влияние на высокоскоростную роторную систему. В статье представлен рисунок внешнего вида экспериментального стенда. Показаны схемы замеров, определения и зависимостей различных параметров и эксплуатационных характеристик. Для сравнительного анализа выходных параметров высокоскоростной роторной системы и точности вращения вала была проведена серия опытов. Также сделаны выводы и показаны основные преимущества газомagnetных опор, основанные на результатах эксперимента.

**Summary.** At the beginning of the article, shaft supports are considered, which are currently used massively in compressors of gas pumping stations. The results of experimental studies of high-speed rotors on gas-magnetic bearings are presented below. To construct the experimental characteristics of stiffness and load on the shaft console, depending on the various values, a research method was developed. Prospects for the introduction of gas-magnetic bearings, in compressors of gas pumping stations, for ensuring the required parameters of speed and reliability are considered. The main performance characteristics are listed, followed by an impact on the high-speed rotor system. The article presents a drawing of the appearance of the experimental walls. Schemes of measurements, definitions and dependencies of various parameters and performance characteristics are shown. For a comparative analysis of the output parameters of a high-growth rotor system and the accuracy of shaft rotation, a series of experiments was carried out. Also conclusions are drawn and the main advantages of gas-magnetic bearings based on the results of the experiment are shown.

**Ключевые слова:** газомagnetные опоры, внедрение, компрессор, колебания.

**Key words:** gas-magnetic support, introduction, compressor, vibration.

УДК 621.51:66

**Введение**

В мировой практике при создании магистральных газопроводов находят все более широкое применение компрессоры с бесконтактными электромагнитными подшипниками (ЭМП). Внедрение компрессоров с ЭМП обусловлено тем, что применение газодинамического безмасляного уплотнения (ГДУ) на компрессорах позволило создать полностью «сухие» компрессоры, т.е. работающие без смазки.

В работе [1] сказано что, департамент по транспортировке газа ОАО «Газпром» в 1994 г., совместно с головными предприятиями по изготовлению компрессоров, принял решение по модернизации и разработке новых газовых компрессоров магистральных газопроводов мощностью 2,5 – 16 МВт с ЭМП и ГДУ, а в 2000 г. и в 2004 г. принял первую, а затем вторую программы по серийному внедрению ЭМП в компрессоры газоперекачивающих агрегатов мощностью от 2,5 до 25 МВт.

Несмотря на эти достоинства, ЭМП в компрессорах имеют ограничения по применению вследствие невысокой несущей способности и сложности как самих ЭМП, так и их электронных систем управления.

Появившиеся в открытой печати публикации о газоманитных опорах позволяют сделать предположение, что такие опоры при использовании их в компрессорах ГПС позволят уменьшить амплитуду динамических колебаний и повысить их надежность в работе [2].

Для изучения применения газоманитных опор (ГМО) в компрессорах ГПС необходимо выполнить исследования по выявлению влияния различных режимных и конструктивных параметров на характеристики работоспособности системы.

С этой целью разработана методика исследований.

**Методика проведения исследований**

В КНАГТУ проводятся исследования по работоспособности ГМО на примере шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков.

В работах [3; 4; 5; 6; 7] на примере шпиндельного узла, представляющем собой ВСРС, подробно приводится методика расчета выходных характеристик роторной системы о различных конструктивных и режимных параметрах.

Для исследования специфики работы высокоскоростных роторных систем (ВСРС) в компрессорных установках был собран экспериментальный стенд.

Исследование выходных характеристик модели высокоскоростного ротора с газоманитными опорами выполнено на экспериментальной установке, изображенной на рис. 1.

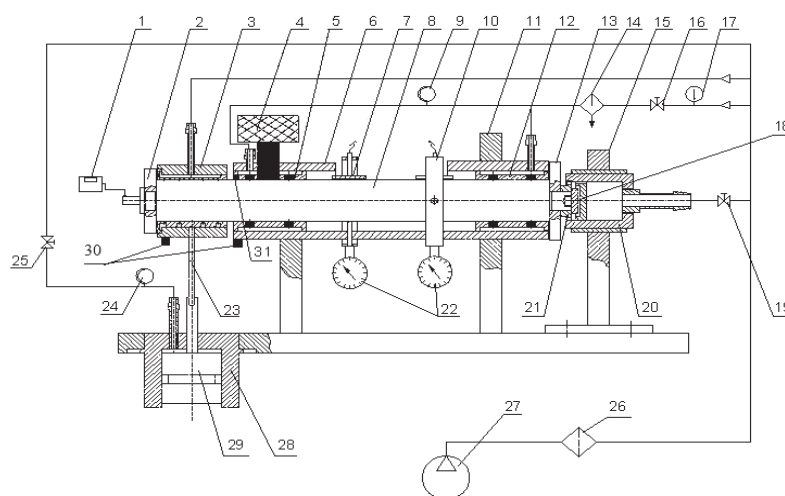


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования выходных характеристик высокоскоростного ротора на бесконтактных опорах

Опорами вала служат газомангнитный подшипник 5 с внешним наддувом газа и газостатический подшипник 12. Передний подшипник включает в себя магнитный подвес 4, состоящий из магнитопровода и соленоида, который запитан регулируемым постоянным током.

Сборка установлена в стойках 11. Кольца 10 фиксируются на корпусе винтами. Кольца предназначены для закрепления приборов и измерения радиального зазора в подшипниках.

Экспериментальный стенд включает в себя: вал 8; нагрузочный подшипник 3; опорные стойки 11; корпус подшипников 6; кольцо 10; подпятники 2, 13; маслолагоотделитель 14; стойку корпуса турбины 15; клапан подвода воздуха к подшипникам 16; клапан подвода воздуха к турбине 19; сопловой аппарат турбины 18; корпус турбины 20; рабочее колесо 21; гибкую связь 23; клапан подвода воздуха к нагрузочному поршню 25; воздушный фильтр 26; компрессор 27; корпус нагрузочного поршня 28; нагрузочный поршень 29; пьезопреобразователи 30; датчик положения ротора 31.

Нагрузка на консоли вала создается поршнем 29, размещенным в корпусе 28. Величина нагрузки регулируется клапаном 25. Шток поршня связан со штоком корпуса нагрузочного подшипника гибкой связью 23. В корпусе нагрузочного подшипника 3 закреплены штуцер для подвода сжатого воздуха и шток для восприятия радиальной нагрузки. Нагрузочный подшипник имеет два сдвоенных кольцевых ряда питателей. В каждом ряду расположено по 16 отверстий. Для восприятия осевых нагрузок на торце подшипника 3 выполнен один ряд питателей с 16 дросселирующими отверстиями. Силовое замыкание вала осуществляется подпятниками 2 и 13.

Приводом вала служит малоразмерная парциальная турбина осевого типа. Корпус 20 турбины расположен в стойке 15. В корпусе крепится сопловой аппарат 18. Сжатый воздух, истекая из соплового аппарата, попадает в межлопаточные каналы рабочего колеса 21 и тем самым приводит во вращение вал.

От компрессора 27 сжатый воздух подается через воздушный фильтр 26 к воздушным опорам вала, нагрузочному подшипнику, нагрузочному устройству и турбине. При статических испытаниях ротора сжатый воздух к турбине не подается. Для очистки сжатого воздуха, подаваемого на наддув подшипников, в схеме предусмотрен маслолагоотделитель 14 циклонного типа.

Частота вращения вала изменяется расходным воздействием с помощью клапана 19. Клапаном 16 регулируется давление наддува воздуха в частично пористые газостатические опоры вала. Для проведения исследований предусмотрена развитая система замеров. Температура воздуха перед подшипниками измеряется ртутным лабораторным термометром 17, заключенным в гильзу.

Внешний вид стенда роторной системы с оборудованием для контроля измерения и управлением параметров представлен на рис. 2.

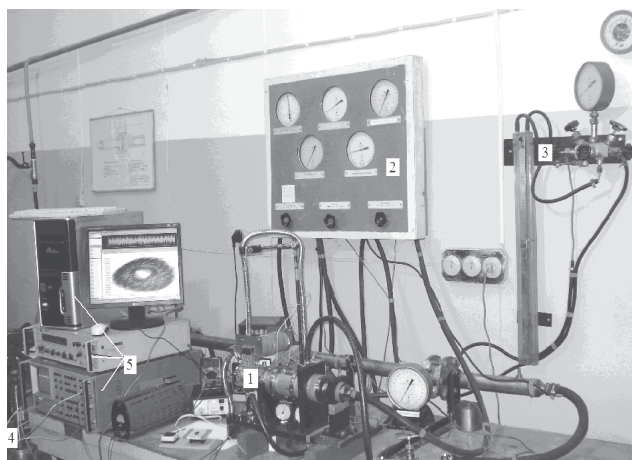


Рис. 2. Внешний вид стенда роторной системы с комплексом оборудования для управления, контроля и измерения параметров:  
 1 – роторная система с газомангнитной опорой; 2 – приборный щит;  
 3 – расходомерное устройство; 4 – циклон для осушки воздуха;  
 5 – комплекс оборудования для контроля точности вращения

Была разработана методика обработки экспериментальных данных, ориентированная на построение опытных характеристик нагрузки и жесткости на консоли вала в зависимости от различных величин.

На рис. 3 представлена схема замеров геометрических параметров модели ротора.

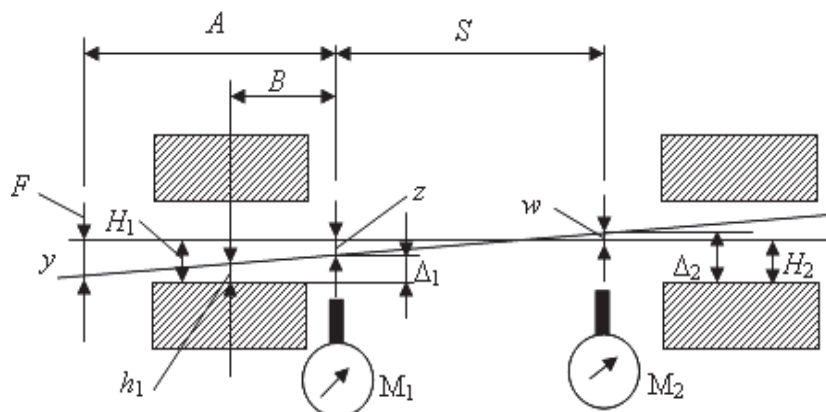


Рис. 3. Схема замеров параметров ротора

Порядок обработки экспериментальных данных следующий:

1. Средний радиальный зазор в переднем подшипнике, м:

$$c_1 = \frac{D - D_1}{2},$$

где  $D$  – внутренний диаметр подшипника, м;  $D_1$  – диаметр вала, м.

2. Текущее значение зазора между валом и вкладышем переднего подшипника, м:

$$h_1 = M_1 - \frac{B}{S}(M_2 - M_1),$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – показания переднего и заднего микрометров соответственно, м;  $B$  – расстояние от оси переднего подшипника до точки установки переднего микрометра (либо до оси переднего емкостного датчика при вращении вала), м;  $S$  – расстояние между точками установки микрометров (либо между осями емкостных датчиков при вращении вала), м.

3. Относительный эксцентриситет в передней опоре вала определяется по формуле

$$\epsilon_1 = 1 - \frac{h_1}{c_1}.$$

4. Относительное давление наддува

$$\bar{p}_s = \frac{p_a}{p_s},$$

где  $p_a$  – барометрическое давление, Па;  $p_s$  – абсолютное давление наддува, Па.

5. Нагрузка на консоли вала  $F_3$  (Н) находится из уравнения моментов относительно точки (A)  $\sum_A M = 0$  в соответствии с представленной схемой на рис. 4. На ось ротора действуют следующие нагрузки:  $F_1$  – вес переднего торцевого подшипника;  $F_4$  – вес переднего конца шпинделя;  $F_5$  – вес шпинделя без учета переднего и заднего концов;  $F_6$  – вес заднего торцевого подшипника и турбинного колеса;  $F_7$  – вес заднего конца ротора;  $F_2$  – вес нагрузочного подшипника, штока поршня и нагрузки, создаваемой нагрузочным устройством

$$F_2 = (m_{н.п} + m_п) \cdot g + p \cdot (S_п - S_{шт}),$$

где  $m_{н.п}$  и  $m_п$  – масса нагрузочного подшипника и поршня соответственно, кг;  $S_п$  и  $S_{шт}$  – площадь поршня и площадь штока поршня соответственно, м<sup>2</sup>;  $p$  – избыточное давление сжатого воздуха в нагрузочном подшипнике, Па.

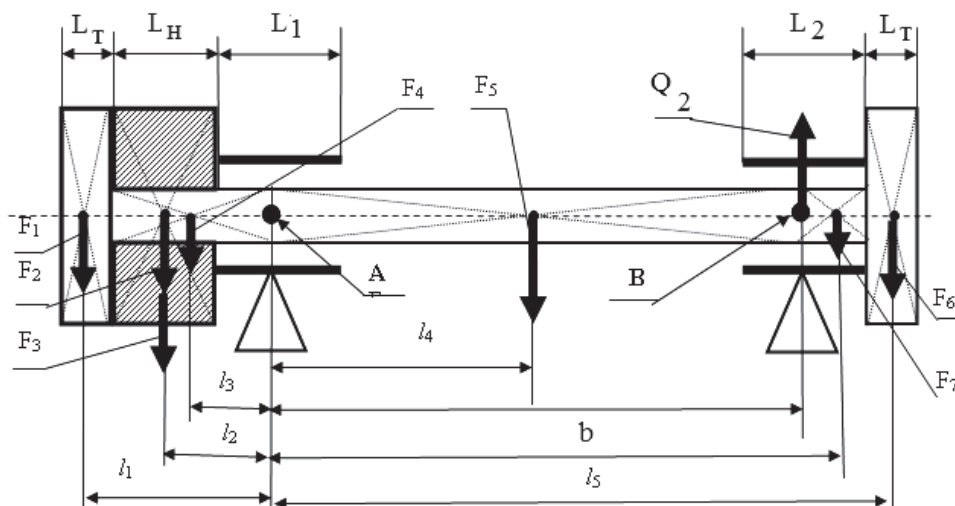


Рис. 4. Схема для определения нагрузки на консоли ротора

## 6. Относительная нагрузка на консоли вала

$$\bar{F} = \frac{F}{(p_s - p_a) \cdot L_1 \cdot D},$$

где  $L_1$ ,  $D$  – длина и внутренний диаметр переднего подшипника, м.

## 7. Смещение консоли вала на линии действия радиальной нагрузки, м:

$$y = \frac{S + A}{S} (z + w) - w,$$

где  $z$  и  $w$  – угловое смещение вала у переднего и заднего подшипников, м.

Смещение вала у переднего подшипника  $z$  находится по формуле

$$z = H_1 - \Delta_1,$$

где  $H_1$  – смещение вала у переднего подшипника без нагрузки на консоли, м;  $\Delta_1$  – смещение вала у переднего подшипника при нагрузке на консоли, м.

Смещение вала у заднего подшипника  $w$  равно

$$w = \Delta_2 - H_2,$$

где  $H_2$  – смещение вала у заднего подшипника при консольной нагрузке, м;  $\Delta_2$  – смещение вала у заднего подшипника без нагрузки на консоли, м.

## 8. Относительное смещение консоли вала на линии действия нагрузки

$$\bar{y} = \frac{y}{c_1}.$$

9. Коэффициент жесткости на линии действия нагрузки

$$k_J = \frac{d\bar{F}}{d\bar{y}}$$

Для определения коэффициента жесткости  $k_J$  опытные зависимости  $\bar{F} = f(\bar{y})$  аппроксимировались полиномом 3-й степени

$$\bar{F} = a_1 \cdot \bar{y} + a_2 \cdot \bar{y}^2 + a_3 \cdot \bar{y}^3,$$

и тогда коэффициент жесткости находится по формуле

$$k_J = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot \bar{y} + 3 \cdot a_3 \cdot \bar{y}^2.$$

10. Число сжимаемости  $\Lambda$

$$\Lambda = \frac{3 \cdot \mu \cdot \omega}{2 p_s} \cdot \left( \frac{D}{c} \right)^2,$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\omega = \pi \cdot n / 30$  – угловая скорость вала, с<sup>-1</sup>;  $n$  – частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>.

11. Удельная магнитная сила  $\bar{F}_M$  определяется экспериментальным способом в следующей последовательности:

- при работе опор в режиме подвеса с помощью индикаторов часового типа регистрируется положение ротора в опорах;
- с помощью нагрузочного подшипника создается нагрузка на консоли ротора;
- путем увеличения магнитной силы ротор возвращается в исходное положение, при этом регистрируется сила тока в соленоиде;
- определяется магнитная составляющая несущей способности передней опоры высокоскоростной роторной системы, равная приращению усилия на нагрузочном подшипнике;
- по данным серии замеров строится тарировочная зависимость  $i_c = f(\Delta F)$ .

При вращении ротора из-за потерь на токи Фуко величина тока  $i_c$  в среднем больше на 10 %.

Также были исследованы зависимости относительной нагрузки  $\bar{F}$  (нагрузки  $F$ ) от относительного эксцентриситета и коэффициента жесткости  $k_J$  (жесткости  $J$ ) от относительного эксцентриситета, результаты представлены на рис. 5 – 6 соответственно.

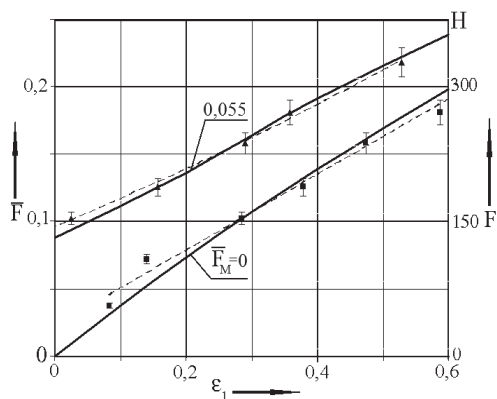


Рис. 5. Зависимости относительной нагрузки  $\bar{F}$  (нагрузки  $F$ ) от относительного эксцентриситета  $\epsilon_1$ : — — — теория; — — — опыт;  $\bar{p}_s = 1/5$ ,  $\Lambda = 0,096$

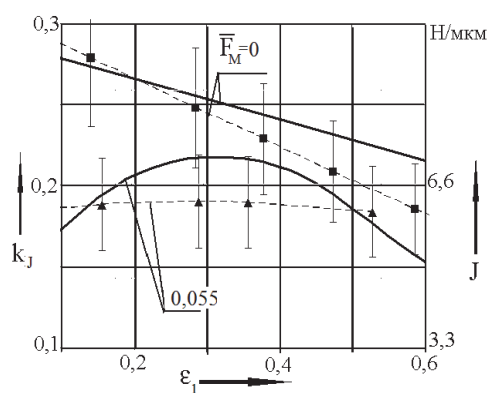


Рис. 6. Зависимости коэффициента жесткости  $k_J$  (жесткости  $J$ ) от относительного эксцентриситета  $\epsilon_1$ : — — — теория; — — — опыт;  $\bar{p}_s = 1/5$ ,  $\Lambda = 0,096$

## Результаты исследований

Во время эксперимента проводилась проверка корректности методики расчета эксплуатационных характеристик, фиксировались выходные характеристики ротора при работе опор в режиме подвеса.

Наблюдалось влияние на роторную систему таких характеристик, как относительный эксцентриситет, удельная магнитная сила, конструктивный параметр, относительная длина магнитопровода, полюсный угол раздвижки магнитопроводов, удлинение газомангнитной опоры, относительный вылет ротора, относительное давление внешнего надува [3; 4].

Также проводилась оценка температурного состояния роторной системы, результаты представлены на рис. 7

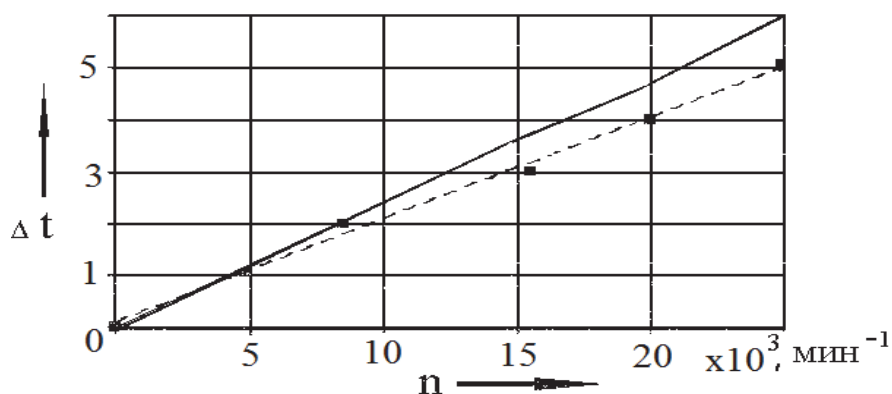


Рис. 7. Зависимости изменения температуры  $\Delta t$  ротора газомангнитной опоры от частоты вращения ротора  $n$  :  
 $\varepsilon_1 = 0,24$ ;  $K_c = 0,265$ ;  $\bar{F}_M = 0,1$ ; ■ – эксперимент; — – теория

## Выводы

На основе результатов экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы.

Газомангнитные опоры обеспечивают снижение виброакустической активности с повышением динамической устойчивости роторной системы.

Проведена серия экспериментов для сравнительного анализа точности вращения шпинделя и выходных эксплуатационных характеристик ВСРС с передней газомангнитной опорой и газостатических традиционно используемых в конструкциях ВСРС. Произведена оценка характеристик ВСРС на шлифовальном круге. Результаты показали, что ВСРС на газомангнитных подшипниках позволяют существенно увеличить нагрузку, измеренную на шлифовальном круге, а также повысить точность обработки за счет уменьшения эллипса синхронного вихря ротора.

Результаты исследования уровня вибрации корпуса роторной системы, траектории движения оси ротора с выключенным и включенным электромагнитом, частотный спектр мощности сигнала с выключенным и включенным электромагнитом – представлены на рис. 8.

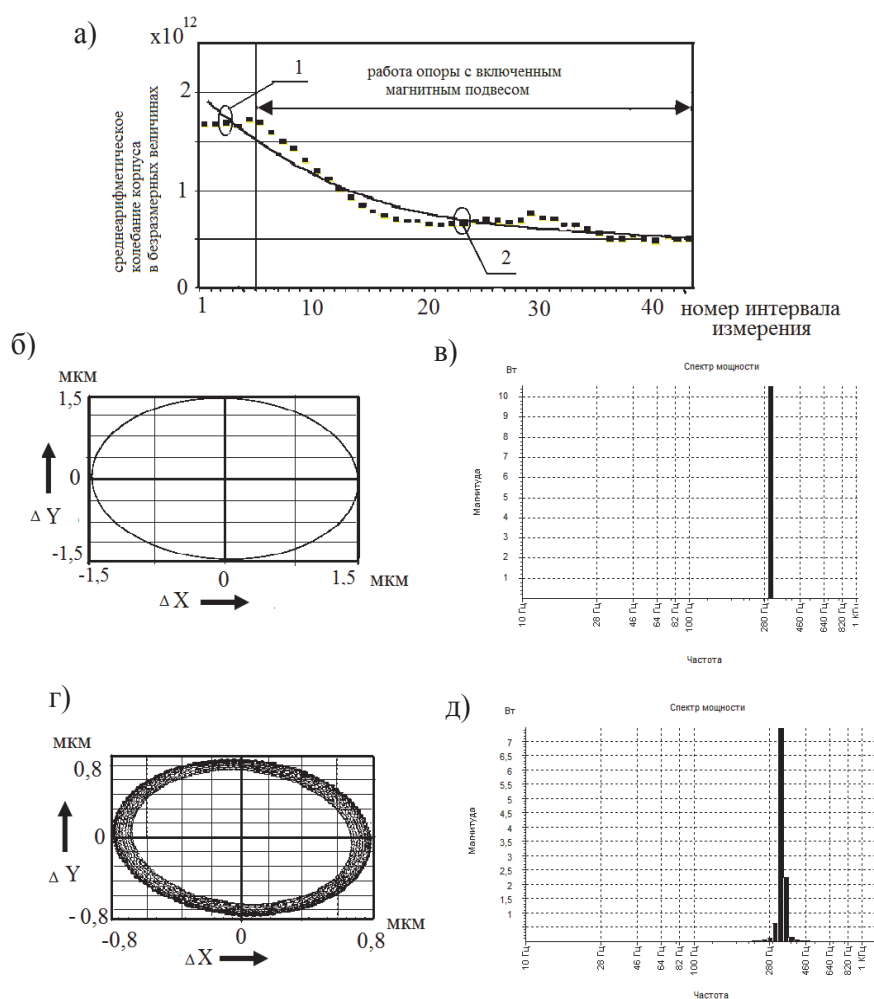


Рис. 8. Уровень вибрации корпуса роторной системы (а), траектории движения оси ротора: с выключенным (б) и включенным электромагнитом (г), частотный спектр мощности сигнала: с выключенным электромагнитом (в) и включенным электромагнитом (д):  $n = 25\ 000\ \text{мин}^{-1}$ ;  $\bar{F}_M = 0,03$ ;  $F = 50\text{Н}$ ;  $\bar{p}_s = 0,2$

Выявив данные преимущества, можно сделать вывод, что применение газоманнитных опор в компрессорах ГПС позволит достичь наилучших результатов по сравнению с другими опорами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Желтов, В. П. Исследование и разработка ряда электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Желтов. – М.: МЭИ, 2010. – 224 с.
2. Пат. 2549002 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 01 D 25/16. Турбокомпрессор с газоманнитными подшипниками / Смирнов В. В., Смирнов А. В., Космынин А. В., Хвостиков А. С. – № 2014117377/06; заявл. 29.04.2014; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11. – 2 с.
3. Космынин, А. В. Основы проектирования высокоскоростных шпиндельных узлов на газоманнитных опорах / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, А. С. Хвостиков. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 181 с.
4. Щетинин, В. С. Определение полезной нагрузки газоманнитного подшипника высокоскоростного шпиндельного узла / В. С. Щетинин, А. В. Космынин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. – 2010. – № I-1. – С. 55-57.
5. Щетинин, В. С. Несущая способность газоманнитных опор шпиндельных узлов / В. С. Щетинин // Вестн. Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та: вып. 13: Ч. 1: сб. науч. тр. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КНАГТУ», 2009. – С. 21-24.



6. Космынин, А. В. Влияние конструктивного параметра газоманитных опор на выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов металлорежущих станков / А. В. Космынин, В. С. Щетинин // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 2. – С. 54-63.

7. Космынин, А. В. Влияние магнитной силы в газоманитных подшипниках на эксплуатационные показатели высокоскоростных шпиндельных узлов металлообрабатывающего оборудования / А. В. Космынин, В. С. Щетинин // Вестник машиностроения. – 2010. – № 5. – С. 5-8.

Лелюхин В. Е., Колесникова О. В., Лисичкин П. П.  
АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ И СОПРОВОЖДЕНИЕМ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

**Лелюхин В. Е., Колесникова О. В., Лисичкин П. П.**  
**V. E. Lelyukhin, O. V. Kolesnikova, P. P. Lisichkin**

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ И СОПРОВОЖДЕНИЕМ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

### **AUTOMATION CONTROL OF DESIGN DOCUMENT DEVELOPMENT AND SUPPORT**

**Лелюхин Владимир Егорович** – к.т.н., доцент кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); +79147235257. E-mail: lelv0@mail.ru.

**Mr. Vladimir E. Lelyukhin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); +7914 723 5257. E-mail: lelv0@mail.ru.

**Колесникова Ольга Валерьевна** – к.т.н., доцент кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); +79146529780. E-mail: miis@mail.ru.

**Ms. Olga V. Kolesnikova** – PhD in Engineering, Assistant Professor, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); +79146529780. E-mail: miis@mail.ru.

**Лисичкин Павел Павлович** – старший преподаватель кафедры технологии промышленного производства Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); +79147070301. E-mail: plisichkin@mail.ru.

**Mr. Pavel P. Lisichkin** – senior lecturer, School of Engineering, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); +79147070301. E-mail: plisichkin@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассматриваются функциональные свойства PDM/PLM систем и условия их применения для автоматизации управления выполнением проектно-конструкторских работ в отечественном машиностроении. В ходе выполнения проектов коллективами исполнителей особую значимость приобретает обеспечение оперативного информационного обмена между исполнителями и корректного отображения любых изменений в конструкторских документах. При этом важно хранить историю всех даже малейших корректировок в свойствах и образе проектируемых объектов и систем. Приведены примеры эффективного использования PLM системы Search на предприятиях Приморского края.

**Summary.** The paper discusses the functional properties of PDM/PLM systems and the conditions for their application to automate the control of design work in domestic mechanical engineering industry. In the course of project implementation, the provision of timely information exchange between performers and the correct display of any changes in design documents is of particular importance. In this case it is important to keep notes of every slight adjustment in the properties and image of the projected objects and systems. The authors give examples of the effective use of the Search system PLM in the enterprises of the Primorsky Territory.

**Ключевые слова:** машиностроение, конструкторская подготовка, управление конструкторской документацией, автоматизация управления, PDM системы, PLM системы

**Key words:** engineering industry, design training, control of design documents, automation of control, PDM systems, PLM systems.

УДК 658.52:658.5.011

#### **Введение**

Качество выполнения конструкторских работ, полнота и корректность оформления конструкторской документации, а также соблюдение условия информационной необходимости и достаточности определяют эффективность дальнейшей работы, связанную с подготовкой производства и изготовлением продукции в связи с возрастающей сложностью изделий и ужесточением требований не только к самой конструкторской документации, но и к её хранению, поиску нужных документов, тиражированию, ограничению доступа и другое, иными словами к управлению конструкторским документооборотом [1, 2, 3].

В прошлом столетии, когда чертежи, составляющие основу технической документации, выполнялись вручную на кульмане на производственных предприятиях и в конструкторских бюро, существовали специальные службы хранения и сопровождения этой документации. Широкое распространение информационных технологий и появление САД-систем породило проблему необходимости оперативного и корректного отслеживания быстрорастущих объемов конструкторской документации в виде файлов различных типов [4].

В конце 1980-х годов, когда отчетливо стали проявляться признаки «потери управляемости» возрастающим потоком сложно структурированных конструкторских документов, возникли первые EDM (Engineering Data Management), а затем PDM (Product Data Management) системы [4]. Следующим этапом развития систем управления техническим документооборотом стали PLM (Product Lifecycle Management) системы, которые обеспечили хранение и управление файлами документов, поддержку специализированных документов, характеризующих состав и структуру элементов изделий, управление уровнями, версиями и ревизиями документов, а также их оперативную визуализацию [2, 4, 5].

Такая функциональность PLM систем позволяет им быстро обращаться к стандартным элементам, структурам спецификации и файлам для повторного использования, и деривации, одновременно снижая риск использования неправильных версий дизайна и увеличивая повторное использование существующей информации о продукте. Тем самым PLM системы позволяют реализовать комплексный подход ко всем аспектам информационной жизни продукта с момента его создания, изготовления, развертывания и обслуживания, а также организацией его вывода из эксплуатации и окончательного удаления [2, 4, 6].

По мнению Джона Тереско, выгоды от операционных PLM выходят далеко за пределы частной эффективности, приводя к большей экономии средств и росту доходов от продаж не только за счет внедрения инструментов и технологий, но и за счет необходимых жестких изменений в процессах и методах, и возможности контроля над жизненным циклом продукта [5].

### **Задачи управления конструкторской документацией**

Машиностроительное изделие представляет собой упорядоченную некоторым образом совокупность информационных и материальных объектов. Установленные между материальными объектами взаимосвязи определяют структуру изделия, соподчиненность деталей, сборочных единиц и других элементов. Конструкторская документация формируется в соответствии с этапами проектирования изделия, определенными стандартами единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Комплект конструкторской документации (ККД) представляет собой совокупность оформленных в ЕСКД документов, которые находятся в строгой соподчиненности между собой. Эта соподчиненность определяется структурой изделия, регламентированной ГОСТ 2.053-2006 [7].

Учитывая стадийность выполнения проекта, разнохарактерность конструкторских документов и сложность структуры их соподчиненности, можно сформулировать следующие основные функции и задачи управления подготовкой и сопровождением документации об изделии.

Функция организации архива документов с набором задач:

- 1) надежное хранение документов;
- 2) быстрый поиск документов;
- 3) выдача и возврат документов;
- 4) восстановление их свойств, при необходимости.

Функция отображения состава и структуры изделия с решением задач:

- 1) определение состава изделия;
- 2) формирование корректной структуры изделия;
- 3) минимизация ошибок при формировании документов;
- 4) минимизация ошибок во взаимосвязях между документами.

Функция управления изменениями документации с задачами:

- 1) управление версиями конструкторской документации;
- 2) определение порядка внесения изменений;

- 3) утверждение изменений документов;
- 4) отслеживание выпущенной документации и внесение изменений в неё.

Функция организации работ по проекту со следующими задачами:

- 1) распределение работ и формирование корректных заданий исполнителям;
- 2) организация эффективного взаимодействия между исполнителями;
- 3) оперативный контроль состояния заданий по исполнителям и всего проекта в целом.

При обычном, так называемом «ручном», сопровождении на предприятиях кроме конструкторских бюро, непосредственно занятых разработкой документации, создавались специальные службы, укомплектованные значительным штатом персонала, для решения вышеуказанных задач.

Современный потребительский рынок требует от промышленности возрастания частоты конструктивных и технологических усовершенствований и сменяемости изделий. А это, в свою очередь, приводит к необходимости быстро и корректно управлять постоянно растущими объемами конструкторской документации. На помощь в этих случаях приходят различного рода автоматизированные системы документооборота.

В мире на сегодняшний день насчитывается большое число автоматизированных систем документооборота для организации централизованного хранения и коллективной работы с неструктурированной информацией в виде сообщений (электронной почты и систем мгновенного обмена сообщениями) и документов (текстовых, структурированных в HTML и XML, электронных таблицах и т.п.). Такие системы получили название ECM (Enterprise content management). В России распространены системы БОСС-Референт, ЕВФРАТ-Документооборот, 1С:Архив, Cognitive Forms Network, Directum, DocsVision и ряд других.

Для управления комплектами конструкторской документации указанные выше системы не подходят в силу недостаточности функциональных возможностей для корректного управления технической документацией, имеющей широкий спектр форматов представления, а также довольно сложную систему постоянно меняющихся взаимных соподчиненностей.

При компьютеризированной подготовке носителем информации становится компьютерный файл. Итогом такой подготовки документации на сложное составное изделие будет некоторое количество файлов, эквивалентных количеству конструкторских документов. При этом возникает комплексная задача хранения и оборота конструкторских документов, представленных в виде файлов.

#### **Функциональность PLM систем**

Несмотря на то, что, по существу, любая PLM система зарождалась как инструмент для корректной организации технического документооборота с обеспечением информационной целостности процесса создания, производства и сопровождения продукта, диапазон функций охватывает ряд иных сфер, например: управление ресурсами в ходе выполнения проектов, управление портфелем продуктов, управление набором знаний и т.д. Фактически современные PLM системы выступают в качестве информационного интегратора данных, процессов, специалистов и бизнес-систем [8, 9].

Из существующего многообразия программных продуктов, претендующих на роль PLM систем, даже половину вряд ли можно отнести к таковым в чистом виде. Дело в том, что устремления значительной части разработчиков направлены на создание интегрированных систем управления предприятиями. Однако при отсутствии строгой теоретической базы системы, построенные с использованием похожих элементов, могут существенно отличаться не только в структурном, но и в функциональном плане. Это объясняется различиями в специфике деятельности конкретных предприятий, для которых формируются интегрированные системы.

Поэтому в ряду программных продуктов как зарубежных, так и отечественных разработчиков не всегда можно четко выделить PLM системы, поскольку отдельные характерные для PLM элементы могут быть встроены в интегрированные системы корпоративного управления.

Например, интегрированное решение Lotsia PLM объединяет в себе и PDM, и ERP систему. Другим примером служит специализированный программный продукт для производственных

предприятий TechnologiCS, включающий элемент для работы с составом изделий и электронным архивом документов (TechnologiCS-PDM), наряду с целым рядом модулей: модуль технологической подготовки производства (TechnologiCS-TPP); модуль складского учета (TechnologiCS-INV); модуль оперативного планирования и учета выполнения работ в цехах (на участках) (TechnologiCS-MAN); электронный архив и канцелярский документооборот (TechnologiCS-DOC).

Несмотря на то, что простые классификации не всегда точно соответствуют содержанию и многие программные продукты охватывают более одной области или не вписываются в одну категорию, можно выделить несколько обобщенных функций, характеризующих современную PLM систему. Подразумевается высокая степень детерминированности этих функций, поскольку речь идет об автоматизированных системах.

1. Управление данными об изделиях (PDM), включающее настройку и управление архивами с контролируемым доступом, а также конфигурирование изделия и управление его составом.
2. Управление жизненным циклом изделия (PLM) для обеспечения возможности внесения изменений в состав и структуру изделия с соблюдением его целостности и контроля над версиями изделия и выпущенными экземплярами документов.
3. Управление потоком бизнес-процессов (Workflow) для обеспечения создания и редактирования процессов и схем согласования и утверждения документов.
4. Управление проектами (Project Management), планирование и управление ресурсами проектов.

Заметим, что перечисленные функции во многом сходны с функциями управления техническим документооборотом.

### **Автоматизация управления конструкторской подготовки на предприятии**

Несмотря на широкое применение современных CAD систем в отечественном машиностроении, автоматизация управления конструкторской подготовкой для многих предприятий остается перспективой. С одной стороны, это объясняется сомнениями в возможности внедрения и осязаемом для высшего руководства экономическом эффекте при довольно значительных затратах. Поскольку рынок машиностроительной продукции в стране пока остается ненасыщенным, мало кто из руководителей решается на довольно серьезный шаг, связанный с внедрением PDM/PLM систем.

В ОАО «Дальприбор» (г. Владивосток) еще в начале 2000-х годов была выработана стратегия построения интегрированной системы автоматизации управления предприятием, предполагающая замену совершенно устаревшей на тот момент вычислительной техники персональными компьютерами, связанными в единую заводскую сеть.

Для формирования единой базы данных, содержащей исходную для работы всего предприятия конструкторскую и технологическую информацию, специалистами отдела информационных технологий был разработан ряд взаимосвязанных систем, включая PDM систему «Dalpribor». Каждый исполнитель имел доступ к работе с составом и структурой (создание, корректировка и удаление) соответствующего узла. Пример интерфейса конструктора для работы с конфигурацией элемента изделия показан на рис. 1.

В качестве инструмента управления проектами руководителями конструкторских бюро и главными конструкторами использовался модуль формирования и корректировки основной структуры изделия с возможностью распределения работ по подразделениям и исполнителям. Внедрение этой системы обеспечило прямой доступ конструкторам к интегрированному информационному ядру предприятия, что позволило значительно сократить сроки подготовки документации, снизить количество ошибок и повысить оперативность внесения корректировок.

Используемая система обеспечивала хранение только одной версии состава и структуры изделия. Учитывая постоянные корректировки, система хранила только самую последнюю измененную версию. В процессе эксплуатации системы все более остро ощущалась необходимость удовлетворения требований CALS-технологий по информационной поддержке объекта на всех этапах его жизненного цикла, а именно управления версиями и хранения всей истории изменений, вносимых в каждую деталь-сборочную единицу или структурную схему.

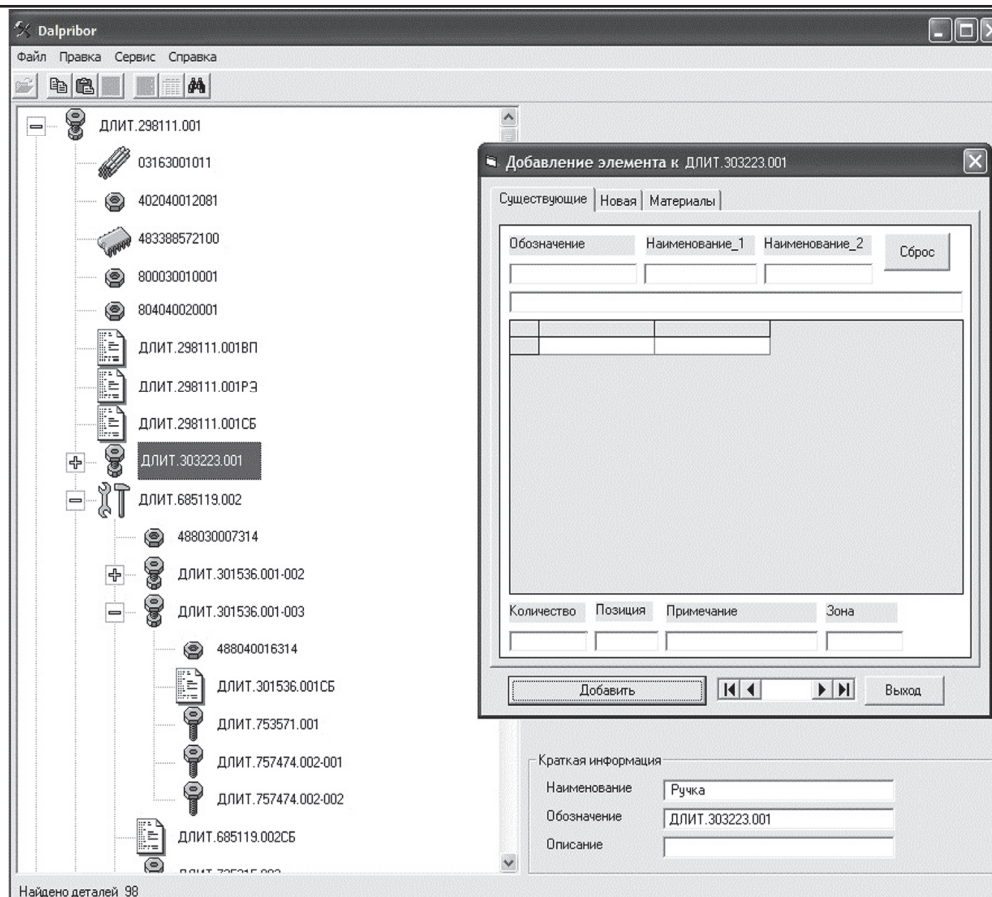


Рис. 1. Фрагмент интерфейса PDM системы «Dalpribor»

Для этих целей были рассмотрены и опробованы четыре варианта предлагаемых на рынке PLM систем, в основном отечественные. По результатам опытной эксплуатации предпочтение было отдано PLM системе Search, разработанной компанией Интермех (Белоруссия).

### Принципы ведения конструкторской документации в PLM Search

В соответствии с ГОСТ 2.053-2013 любое изделие представляется составом и определенной структурой, характеризуемой двумя множествами: множеством элементов в виде деталей-сборочных единиц (ДСЕ) и множеством отношений между этими элементами.

Базовыми элементами в PLM Search являются объекты и документы. Характерно, что в рассматриваемой системе основным элементом («кирпичиком») проектируемого или изготавливаемого изделия является объект. Под объектами понимаются любые сущности окружающего мира, которые могут иметь физическое воплощение или логическое представление. Примерами объектов могут служить здания и сооружения и др. Существует несколько типов объектов. Каждый тип объекта определяет набор параметров и набор связей с другими типами. Состав изделия представляется в виде множества (набора) объектов. Структура изделия или его конфигурация полностью определяется взаимосвязями между объектами в составе этого изделия.

В итоге задуманная и представленная разработчиком в PLM Search конфигурация в виде набора объектов различных типов и взаимоотношений между ними моделирует «скелет» (состав и структуру) изделия или его составной части (см. рис. 2).

На рис. 3 показан пример различных форм визуализации состава и структуры изделия в системе Search. В пределах неизменности структуры изделия система предоставляет возможность сортировки объектов по типам, а также при включении фильтрации отображения структуры объектов только заданного типа.

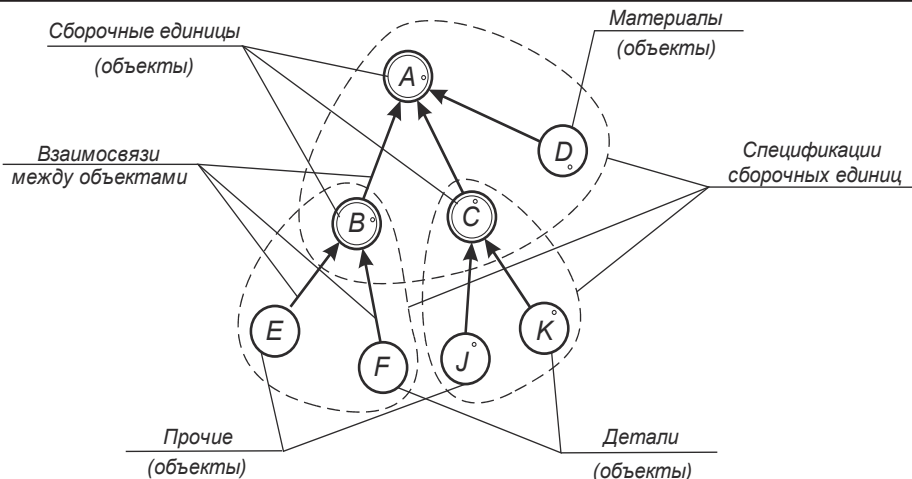


Рис. 2. Структура изделия в виде объектов и взаимосвязей

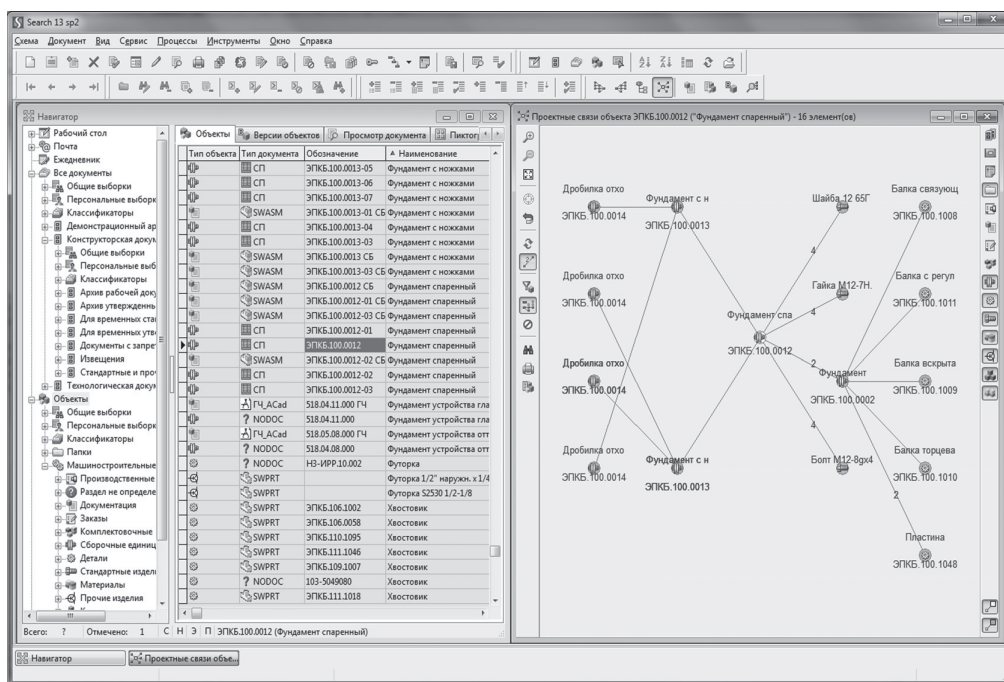


Рис. 3. Формы отображения состава и структуры изделия в виде объектов и взаимосвязей в Search

Параллельно с информацией об объектах, включая их схемы связей (структуры), используемых на предприятии, ведется архив документов с использованием картотеки. Элементом картотеки является карточка документа. Для различных по типу документов можно определить соответствующую структуру содержания карточек. Например, карточки чертежей проектной документации из архива проектных групп могут содержать информацию о наименовании объекта проектирования, а документы из архива канцелярии – входящие номера писем и адреса для ответов и т.д. Таким образом, карточка является элементом, связующим объекты и конструкторские документы.

В ходе выполнения проекта формируются и «привязываются» к описываемым объектам конструкторские документы, которые конкретизируют геометрию и свойства этих объектов. Понятие документа ГОСТ 2.102-2013 регламентирует как зафиксированной на материальном носите-

ле информации, определяющей конструкцию изделия и обладающей признаками, позволяющими её идентифицировать. Конструкторский документ может храниться и передаваться в пространстве и времени и состоит из содержательной и реквизитной частей. Содержательная часть включает техническую информацию ради передачи, которой создан документ. Реквизитная часть включает сведения, по которым документ может быть идентифицирован и авторизован. Информация содержательной части документа хранится в файле, идентификационные параметры которого указаны в карточке.

Таким образом, для управления документами в PLM системе для каждого объекта в структуре изделия в конечном итоге выстраивается цепочка объект  $\Rightarrow$  документ  $\Rightarrow$  файл. Связующим звеном между объектом и документом является карточка документа.

Пример визуализации связей объектов и документов на экране в PLM Search показан на рис. 4.

а)

б)

Обозначение	Наименование	Коли...	Архив
ЭПКБ.100.0014-24	Дробилка отходов		Личный архив А.Г. Рогулина
ЭПКБ.100.0010-02	Измельчитель	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.0017-03	Кожух	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.0018	Кожух	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1041	Стенка	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1040	Стенка	2 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1044	Кронштейн	2 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1042	Кронштейн	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1042-01	Кронштейн	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1043	Кронштейн	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1045	Распорка	3 шт	Для временных утвержденных
Болт М8-8pх18.58.029 ГОСТ 7798-70		16 шт	
Болт М8-8pх28.58.029 ГОСТ 7798-70		1 шт	
Гайка М8-7H4.029 ГОСТ 5915-70		18 шт	
Шайба С.6.029 ГОСТ 11371-78		19 шт	
ЭПКБ.100.0011	Кожух двигателя	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1034	Кожух двигателя	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1037	Стенка задняя	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1039	Стенка передняя	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.0013-04	Фундамент с ножками	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.0015	Электродвигатель 7,5кВт со шкивом	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1033	Шайба шкива	1 шт	Для временных утвержденных
ЭПКБ.100.1032	Шкив двигателя	1 шт	Для временных утвержденных
Болт М10-8pх35.58.029 ГОСТ 7798-70		4 шт	
Болт М12-8pх30.58.029 ГОСТ 7798-70		1 шт	
Гайка М10-7H4.029 ГОСТ 5915-70		4 шт	
Шайба 10 65F 029 ГОСТ 6402-70		4 шт	
АИР 13254 V2 7,5кВт, 1500об/мин, 38...		1 шт	Для временных утвержденных
Болт регулировочный		1 шт	Для временных утвержденных
Ремень С(В)-1800 ГОСТ 12841-89		3 шт	Для временных утвержденных

Рис. 4. Фрагмент изделия в PLM Search: а – структуры объекта; б – объекты с присоединенными документами

### Управление изменениями в PLM Search

Самой важной отличительной особенностью PLM от PDM является наличие функционала управления изменениями и корректного хранения истории этих изменений, что позволяет получать сведения о текущем состоянии разрабатываемых или изготавливаемых изделий на любой момент времени в течение всего жизненного цикла.

В нашей стране для учета и отслеживания любых изменений в конструкторской документации разработан механизм, регламентируемый ГОСТ 2.503-2013. Этот механизм реализован средствами PLM Search. После утверждения конструкторских документов в системе Search они могут быть изменены только с помощью выпуска извещения об изменении. Таким образом, система контролирует не только выпуск конструкторских документов, но и их изменение. При этом в базе данных хранятся все версии конструкторских документов с извещениями на их изменения. Кроме того, имеется возможность указания актуальности версии на заданный период времени. Такой подход позволяет не только учитывать вновь внесенные изменения, но и дает возможность «откатиться» к предыдущей версии.

Для организации контроля разработанные конструкторские документы подлежат проверке и согласованию ответственными лицами. Порядок проверок и согласования зависит от особенно-

стей отрасли, предприятия и может отличаться на различных предприятиях, для разных типов документов, различных стадий разработки, разных проектов и т.д.

В системе имеется модуль управления потоком бизнес-процессов (Workflow), обеспечивающий автоматизированную передачу документов по цепочке проверок и согласований. Он позволяет гибко настраивать маршруты прохождения документов, последовательность сбора подписей, ответственные должности и обмен сообщениями. Таким образом, после завершения разработки документа конструктор инициирует процесс сбора подписей, запуская один из настроенных в системе маршрутов. Документ, отправленный по маршруту, отображается во входящем сообщении у пользователя, который был указан подписантом при настройке маршрута. Подписанный документ уходит по маршруту дальше, отклоненный с замечаниями возвращается на доработку в начало маршрута. Тем самым подобная организация работы позволяет контролировать сроки и качество разработки конструкторской документации, управлять работой проектной группы.

Организованная таким образом система документооборота позволяет выполнять широкий набор функций конструкторской подготовки производства, соответствующих PLM системе и описанных выше.

### Заключение

Сегодня в ПАО «Дальприбор» PLM Search является неотъемлемым элементом интегрированной информационной системы управления предприятием. Многолетняя эксплуатация этой системы показала её высокую надежность и эффективность при одновременном управлении разноплановыми проектами. Оперативный информационный обмен между конструкторами и технологами позволил сократить сроки разработки и освоения новых изделий и их модификаций. Благодаря использованию информационных технологий для оперативного и корректного отображения изменений в конструкторских документах и ведению электронной картотеки отпала необходимость наличия большого штата архивных служб.

С 2015 года PLM Search успешно эксплуатируется на предприятии ООО «Первое КБ» (г. Владивосток), занимающимся разработкой машиностроительных изделий и комплексов производственного назначения. Благодаря широким функциональным возможностям и простоте освоения, наличие этой системы позволило наладить эффективное управление выполнением конструкторских разработок и оперативный обмен информацией между исполнителями.

Использование PLM систем для автоматизации управления разработкой и сопровождением конструкторской документации на указанных предприятиях позволило не только повысить качество и снизить сроки конструкторской подготовки, но и перевести предприятия на принципиально новый уровень информационного обеспечения для взаимодействия всех служб предприятия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лелюхин, В. Е. Принципиальная схема организации системы подготовки производства на машиностроительном предприятии / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Теория и практика в инновационных технологиях: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Владивосток: ДВЦИТ, 2016. – С. 44-53.
2. Karniel, A. Managing the Dynamics of New Product Development Processes / A. Karniel and Y. Reich. – Springer-Verlag London Limited, 2011.
3. Лелюхин, В. Е. Интегрированная система конструкторско-технологической подготовки и управления производством на платформе 1С:УПП / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 9. – С. 34-38.
4. Antti Saaksvuori, Anselmi Immonen. Product Lifecycle Management. – Springer: Third Edition, 2008.
5. Teresko, John. The PLM Revolution. IndustryWeek. 21 December 2004 / John Teresko. – URL: <http://www.industryweek.com/companies-amp-executives/plm-revolution>.
6. Hirz, M. Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development: Development Processes, Geometric Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data Management / M. Hirz. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – XIX, 466 p.
7. Peltonen, H., Concepts and an Implementation for Product Data Management / H. Peltonen // Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics and Computing Series. – No. 105. – Espoo, 2000. – 188 pp.
8. Kampffmeyer Ulrich. ECM Enterprise Content Management. Hamburg. 2006. Publication in English, French, and German.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
METALLURGY AND MATERIALS

**Попов Э. И., Репин Ю. М., Шубин А. Б.**  
E. I. Popov, Yu. M. Repin, A. B. Shubin

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В НЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МЕДНЫХ ЗАГОТОВОК**

**MODELING OF CONTINUOUS CRISTALLIZATION PROCESS FOR CYLINDRICAL  
COPPER BILLETS**

**Попов Эрколий Иванович** – кандидат технических наук, ведущий инженер Уральского научно-исследовательского института метрологии (Россия, Екатеринбург). E-mail: popovei@uniim.ru.

**Mr. Erkolii I. Popov** – PhD in technical sciences, leading engineer of the Ural Research Institute for Metrology (Russia, Yekaterinburg). E-mail: popovei@uniim.ru.

**Репин Юрий Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент Уральского федерального университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: yuri.repin@usu.ru.

**Mr. Yuri M. Repin** – PhD in physical and mathematical sciences, assistant professor, Ural Federal University (Russia, Yekaterinburg). E-mail: yuri.repin@usu.ru.

**Шубин Алексей Борисович** – доктор химических наук, заведующий лабораторией Института металлургии УрО РАН (Россия, Екатеринбург). E-mail: fortran@list.ru.

**Mr. Alexey B. Shubin** – Doctor of Chemical Science, Institute of Metallurgy UB RAS, Head of laboratory (Russia, Yekaterinburg). E-mail: fortran@list.ru.

**Аннотация.** Моделируется работа установки непрерывного горизонтального литья. Делается анализ тепловых процессов в медно-графитовом кристаллизаторе и отливаемой заготовке.

**Summary.** The work of a continuous horizontal casting plant is simulated. An analysis is made of the thermal processes in the copper-graphite mold and cast workpiece.

**Ключевые слова:** кристаллизация, непрерывное горизонтальное литьё, коэффициент теплопередачи.

**Key words:** crystallization, horizontal continuous casting, heat transfer coefficient.

УДК 539.3:621.74

**Введение**

Полученные в статье [6] результаты дают возможность предсказать характер тепловых процессов в реальных установках непрерывного литья, моделировать работу таких установок, используя подстановку в граничные условия задачи Стефана коэффициента теплопередачи вместо коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплопередачи как функцию координаты, вдоль которой движется затвердевающий металл, можно воспринимать как математическое описание литейной установки, тех её составных частей, в которых происходит изменение теплового состояния отливаемого металла: кристаллизатора, блока вторичного охлаждения, пути остывания на воздухе.

Математическое моделирование помогает понять многие особенности процесса непрерывного литья, для проверки различных гипотез позволяет создавать условия, которые на практике затруднительно или невозможно реализовать. Это относится к диапазону таких задаваемых величин, как исходная температура металла, скорость литья, теплотехнические характеристики конструкционных материалов кристаллизатора.

В данной работе в качестве объекта моделирования выбран один из возможных вариантов установки непрерывного горизонтального литья медных заготовок как прутковых, так и трубных.

Приведены алгоритмы вычисления коэффициентов теплопередачи для различных участков по пути следования металла от жидкого состояния до остывающей на воздухе заготовки.

### Математическая модель литья трубной заготовки

Представленные в статье [6] уравнения и граничные условия дополняются уравнением теплового состояния дорна (графитовая деталь, формирующая внутреннее отверстие в отливке) и условиями на границе меди и графита.

Уравнение теплового состояния дорна

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda_{\text{гр}}(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{гр}}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda_{\text{гр}}(T)$  – коэффициент теплопроводности графита; будем считать его величиной постоянной, равной некоторому среднему значению на интервале температур работы дорна в трубном кристаллизаторе;  $x$  и  $r$  – координаты в цилиндрической системе;  $x$  изменяется от 0 до координаты конца дорна,  $r$  изменяется от 0 на оси до  $R_0$  – радиус дорна, который по условиям задачи имеет цилиндрическую форму и совпадает с внутренним радиусом отливаемой трубы. Дорн неподвижен, поэтому в уравнении (1) отсутствует слагаемое с множителем  $v$  – скоростью литья.

Условия на границе медь – дорн зависят от фазового состояния меди. Если медь жидкая, то выполняется условие равенства температур меди и графита в точках их соприкосновения, при этом нормальные производные температур должны быть согласованы между собой так, чтобы обеспечить равенство потоков тепла в жидкой меди и графите через площадь границы с учётом различия их коэффициентов теплопроводности

$$\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial r} = \lambda_{\text{ж.м}} \frac{\partial T_{\text{ж.м}}}{\partial r}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{\text{ж.м}}$  и  $T_{\text{ж.м}}$  – коэффициент теплопроводности и температура жидкой меди;  $T_{\text{гр}}$  – температура графита.

По условиям задачи плотность меди не зависит от её температуры и агрегатного состояния. В реальности имеет место скачок плотности при фазовом переходе и дальнейшее тепловое сжатие меди в процессе снижения температуры. Чтобы не происходило обжатия дорна кристаллизовавшейся медью, его изготавливают конусным, с таким сужением, чтобы обеспечить воздушную прослойку между ним и внутренней поверхностью трубной заготовки до конца дорна. Толщина этой прослойки воздуха растёт по мере удаления от точки кристаллизации на дорне, а её термическое сопротивление тепловому потоку столь велико, что теплообменом между твёрдой медью и дорном можно пренебречь. И вместо граничных условий (2) наступает тепловая изоляция внутренней поверхности трубной заготовки, которая сохраняется и после конца дорна.

Торец дорна, контактирующий только с воздухом, всегда находится в условиях тепловой изоляции, потерями тепла через излучение пренебрегаем.

Новая запись граничных условий на поверхности заготовки имеет вид

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = [T(x, R) - T_{\text{нар}}(x)] k(x), \quad (3)$$

где  $k(x)$  – коэффициент теплопередачи.

Методика решения новой системы уравнений с новыми граничными условиями остаётся прежней: сводим стационарную задачу к нестационарной, фиктивной, строим разностную схему последовательных приближений, ход итерационного процесса оцениваем по прежним критериям.

Отметим, что расчёты коэффициентов теплопередачи к окружающей среде для пруткового и трубного кристаллизаторов ничем не отличаются друг от друга.

### Физическая модель установки непрерывного литья

Модельные представления об установке и тепловых процессах в ней включают в себя следующие упрощения:

1. Считаем, что скорость движения металла постоянна, равна средней скорости его движения в старт-стопном режиме, который используется в реальности при горизонтальном литье. Для получения картины тепловых процессов это допустимо, хотя установки непрерывного горизонтального литья принципиально не работают в таком режиме.

2. Используя для описания процесса охлаждения металла коэффициенты теплопередачи, мы должны предположить, что в контактирующих с движущимся металлом частях установки нет перетоков тепла в направлении движения (кроме дорна), все тепловые потоки в них имеют радиальную направленность.

3. Тепловую усадку металла при расчётах коэффициентов теплопередачи с окружающей средой необходимо учитывать, так как она приводит к образованию воздушных прослоек, самым существенным образом влияющих на величину этих коэффициентов и, соответственно, на тепловые процессы в отливаемой заготовке.

4. Так как литьё прутковых и трубных заготовок совершается на аналогичных, а часто на одних и тех же установках, то коэффициенты теплопередачи вычисляются по одним и тем же алгоритмам. Дополнительная информация в случае литья трубной заготовки вносится в исходные данные при решении уравнений – это геометрические размеры и теплофизические характеристики материала дорна.

Для моделирования выберем один из возможных вариантов конструкции установки непрерывного горизонтального литья медной трубной заготовки как более общий случай литья (см. рис. 1).

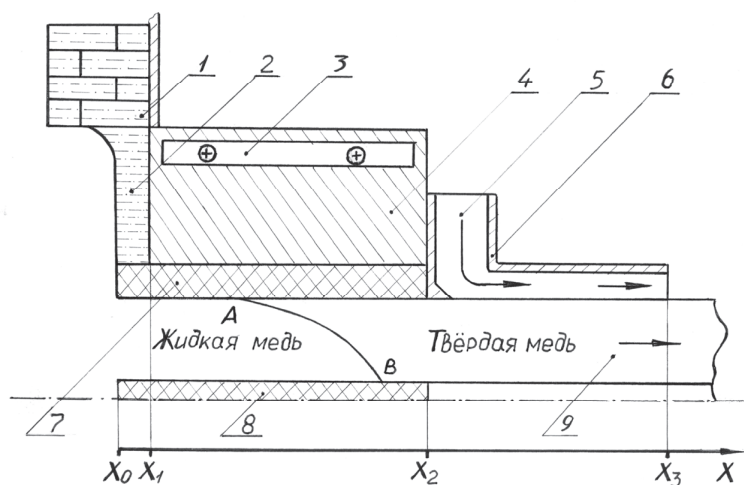


Рис. 1. Схема медно-графитового кристаллизатора для литья медных трубных заготовок

Медный блок 4 с наружным диаметром  $d_2$  длиной от  $x_1$  до  $x_2$  охлаждается водой 3, делающей полный оборот вокруг его наружной поверхности, вставлен в стенку печи 1. От расплава меди он защищён шамотным «хвостовиком» 2 толщиной от  $x_0$  до  $x_1$ . Через них проходит графитовая втулка 7, запрессованная в медный блок. Протяжённость втулки от  $x_0$  до  $x_2$ , её наружный диаметр  $d_1$ , а внутренний –  $D$ , в ней формируется наружный диаметр заготовки 9. Графитовый дорн 8 диаметром  $D_0$  формирует внутренний диаметр трубной заготовки, имеет протяжённость, как правило, совпадающую с длиной графитовой втулки 7, и изготовлен из графита той же марки.

В рабочем режиме скоростей литья кристаллизация начинается на наружной поверхности заготовки (точка  $A$ ) и заканчивается на поверхности дорна (точка  $B$ ). Таким образом, глубина лунки жидкого металла  $x_B - x_A$ .

Вплотную к медному блоку 4 примыкает устройство вторичного охлаждения 6 длиной  $x_3 - x_2$ . Водяной поток 5 образует вокруг заготовки 9 цилиндр диаметром  $d_3$ . По направлению движения поток совпадает с направлением литья, а по скорости превосходит скорость литья в несколько раз.

После устройства вторичного охлаждения заготовка остывает на воздухе.

### Теплообмен с окружающей средой

Составим выражения для коэффициентов теплопередачи на различных участках по пути следования металла: шамотный «хвостовик», кристаллизатор, вторичное охлаждение, остывание на воздухе. Для каждого участка будет своя температура  $T_{нар}(x)$  для подстановки в уравнение граничных условий (3). Размерность коэффициента теплопередачи  $k = k(x)$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) совпадает с размерностью коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . График зависимости  $k(x)$  для случая литья заготовки диаметром 35 мм со скоростью 0,8 м/мин приведён на рис. 2.

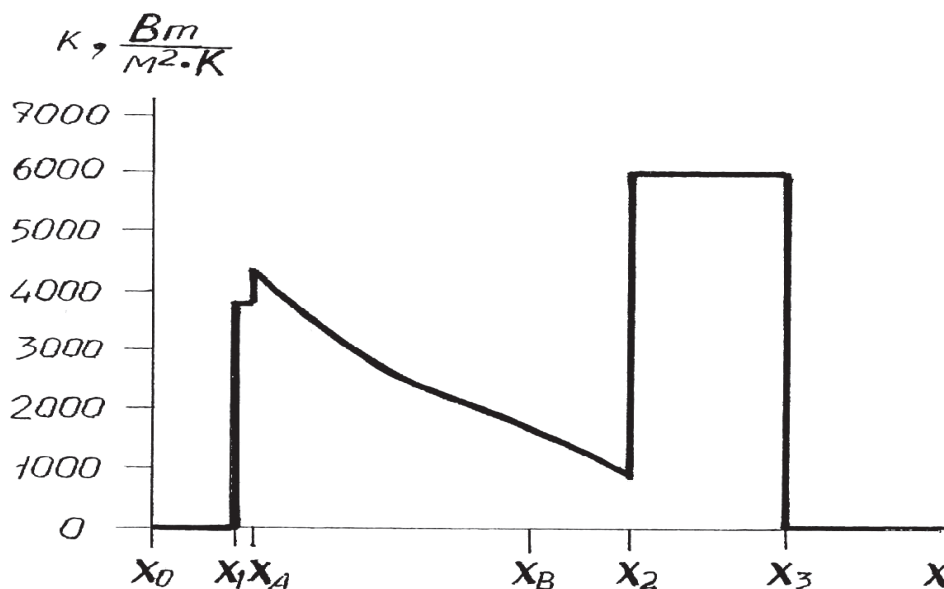


Рис. 2. Изменение коэффициента теплопередачи при литье заготовки диаметром 35 мм от входа в кристаллизатор до остывания её на воздухе

$x$  изменяется от  $x_0$  до  $x_1$ . Жидкая медь проходит через «хвостовик». Теплопередачей на этом участке пренебрегаем, так как шамот «хвостовика» считаем теплоизолятором  $k_1 = 0$ .

$x$  изменяется от  $x_1$  до  $x_A$  – координаты точки начала кристаллизации на поверхности заготовки. На этом участке жидкая медь контактирует с графитом втулки

$$k_2 = \frac{1}{D \left( \frac{1}{\alpha_{ж.м} D} + \frac{1}{2\lambda_{гр}} \ln \frac{d_1}{D} + \frac{1}{2\lambda_{м.б}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{вод1} d_2} \right)}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{ж.м}$  – коэффициент теплоотдачи на границе жидкой меди и графитовой втулки, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_{м.б}$  – коэффициент теплопроводности материала блока, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{вод1}$  – коэффициент теплоотдачи воды первичного охлаждения, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплоотдачи жидкой меди находим из формулы

$$Nu = \frac{\alpha_{ж.м} d_{эк}}{\lambda_{ж.м}},$$

где  $Nu = 4,36$  – число Нуссельта [3, 243];  $d_{эк}$  – эквивалентный диаметр, для прутковой заготовки  $d_{эк} = D$ , для трубной  $d_{эк} = D - D_0$ ;  $\lambda_{ж.м}$  – коэффициент теплопроводности жидкой меди.

Для коротких кристаллизаторов вводится поправочный множитель  $\varepsilon_l = 1,7 \left( \frac{d_{эк}}{l} \right)^{0,16}$ , в нашем случае  $l = x_2 - x_1$ . Критерий короткого кристаллизатора  $l < 30 d_{эк}$ . В итоге коэффициент теплоотдачи жидкой меди

$$\alpha_{ж.м} = \frac{4,36 \lambda_{ж.м}}{d_{эк}} \varepsilon_l.$$

Коэффициент теплоотдачи воды первичного охлаждения находится из формулы

$$Nu = \frac{\alpha_{вод.1} d_{эк.вод.1}}{\lambda_{вод}},$$

где  $\alpha_{вод.1}$  – коэффициент теплоотдачи воды первичного охлаждения;  $\lambda_{вод}$  – коэффициент теплопроводности воды для её средней температуры в первичном охлаждении;  $d_{эк.вод.1} = \frac{4S}{P}$  – эквивалентный диаметр прямоугольного канала первичного охлаждения, м;  $S = \delta \times h$  – площадь его сечения,  $m^2$ ;  $\delta, h$  – стороны прямоугольного канала, м;  $P = 2\delta + 2h$  – периметр канала, м.

Для расчёта теплоотдачи при турбулентном характере движения воды, что имеет место в системе первичного охлаждения, число Нуссельта находится из уравнения [5, 89]

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{100})^{0,25} \varepsilon_l,$$

где  $Pr$  – число Прандтля для средней температуры воды первичного охлаждения;  $Pr_{100}$  – число Прандтля для температуры воды приграничного слоя ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $Re = \frac{V_{вод.1} d_{эк.вод.1}}{\nu}$  – число Рейнольдса;

$V_{вод.1}$  – скорость воды в первичном охлаждении, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость воды для её средней температуры в системе первичного охлаждения,  $m^2/c$ ;  $\varepsilon_l$  – поправочный множитель для случая коротких каналов. Критерий короткого канала в нашем случае  $\pi d_2 < 50 d_{эк.вод.1}$ . Значения  $\varepsilon_l$  приведены в работе [5, 90]. Для изогнутых каналов вводится ещё один поправочный множитель

$$\varepsilon_R = \left( 1 + 1,77 \frac{2d_{эк.вод.1}}{d_2} \right) [5, 92].$$

В итоге выражение для коэффициента теплоотдачи воды первичного охлаждения принимает вид

$$\alpha_{вод.1} = Nu \frac{\lambda_{вод}}{d_{эк.вод.1}} \varepsilon_l \varepsilon_R.$$

Величины коэффициентов теплопроводности воды  $\lambda_{вод}$ , кинематической вязкости  $\nu$ , числа Прандтля  $Pr$  и  $Pr_{100}$  брались из работы [5, 321].

Отметим, что в точке  $A$  зародившаяся тонкая корочка меди контактирует с графитом втулки. В момент фазового перехода плотность меди скачком возрастает на 4 %, и можно было бы

ожидать отхода корочки от втулки. Но этого на практике не происходит, так как металлостатическое давление столба жидкой меди в печи прижимает корочку к стенке втулки. Это приводит к появлению трения, интенсивному остыванию.

Корочка растёт в толщину, плотность её увеличивается одновременно с прочностью, и она, успешно сопротивляясь металлостатическому давлению, отходит из-за температурного сжатия от стенки втулки. Протяжённость и длительность такого контакта невелика, сравнима с длиной и длительностью шага вытягивания [4], поэтому мы посчитали, что можно не учитывать тонкие механические процессы около точки  $A$  при решении тепловой задачи и рассматривать эту точку как начало образования воздушной прослойки.

Первое слагаемое  $\frac{1}{\alpha_{ж.м} D}$  в знаменателе формулы (4) исчезает, термическое сопротивление теплоотдачи заменяется контактом корочки с графитом втулки, что приводит к скачку коэффициента теплопередачи с 3950 до 4400 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$X$  изменяется от  $x_A$  до  $x_2$  – конца графитовой втулки. На этом участке коэффициент теплопередачи очень сильно зависит от термического сопротивления воздушной прослойки. В узкой воздушной прослойке слабо развиваются конвективные явления, и её тепловые свойства можно описывать коэффициентом теплопроводности воздуха  $\lambda_{возд}(T)$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k_3 = \frac{1}{D \left( \frac{1}{2\lambda_{возд}(T)} \ln \frac{D}{D(T)} + \frac{1}{2\lambda_{гр}} \ln \frac{d_1}{D} + \frac{1}{2\lambda_{м.б}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{вод1} d_2} \right)}. \quad (5)$$

Здесь  $\lambda_{возд}(T) = 0,024 + 0,000056T$  – коэффициент теплопроводности воздуха как функция температуры [1, 416];  $D(T) = D [1 - 0,000021(1084 - T)]$  – расчётный диаметр медной заготовки в результате тепловой усадки [2, 70]. Эти расчётные формулы – результат аппроксимации табличных данных. В них  $T$  – температура поверхности медной заготовки.

Эффект от появления воздушной прослойки – вклад первого слагаемого в знаменателе формулы (5) – на величину коэффициента  $k_3$  хорошо прослеживается на рис. 2. Его величина снижается на этом интервале с 4400 до 770 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

На интервале от  $x_1$  до  $x_2$  в качестве  $T_{нар}$  для подстановки в граничные условия (3) задачи принимаем среднюю температуру воды первичного охлаждения.

$X$  изменяется от  $x_2$  до  $x_3$ . Это зона вторичного охлаждения полученной заготовки. Здесь  $k_4 = \alpha_{вод2}$ , коэффициент теплопередачи равен коэффициенту теплоотдачи воды вторичного охлаждения. На этом участке после выхода из кристаллизатора температуру заготовки нужно снизить с нескольких сот градусов Цельсия до нескольких десятков. Моделирование позволяет нам, варьируя величину коэффициента теплоотдачи, добиться нужного эффекта при задаваемой длине устройства вторичного охлаждения. Найденное значение  $\alpha_{вод2}$  позволяет конструировать его, руководствуясь закономерностями, приведёнными в работе [5, 89].

В качестве  $T_{нар}(x)$  при решении уравнений используется средняя температура воды вторичного охлаждения.

$X > x^3$ . Остывание заготовки на воздухе.  $k_5 = \alpha_{возд}$ . Диапазон изменения этой величины для случаев литья заготовок диаметром до 50 мм составляет от 5 до 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Для расчётов можно использовать любое значение коэффициента теплоотдачи воздуха в этом промежутке и, приняв температуру окружающего воздуха равной 20 °С, сформулировать требования (3) на границе  $T(x, R) - T_{нар} = 5$  °С, достигаемые при координате  $x$ , равной некой конкретной величине, например 1 м. Проблема не носит принципиального характера, и такая вольность никак не сказывается на результатах расчётов тепловых процессов при фазовых превращениях.

### Температурное поле на участке кристаллизации

Сложный ход зависимости  $k = k(x)$  на пути от  $x_A$  до  $x_B$  позволял предположить, что это обстоятельство сильно отразится на ходе температурных кривых и форме лунки при сравнении их с вариантами  $\alpha = \text{const}$  [6]. Но ничего подобного не происходит. Скрытая теплота затвердевания компенсировала и сильный, и слабый отвод тепла из зоны кристаллизации да так, что поле температур заметных изменений не претерпело.

Для случая литья трубной заготовки  $35 \times 10$  мм со скоростью 0,714 м/мин на рис. 3 представлены температурные кривые для её наружной и внутренней поверхности. Эти расчёты были произведены с использованием исходных данных реального процесса литья: геометрических размеров кристаллизатора, расхода воды первичного охлаждения, её температуры на входе и выходе, коэффициента теплоотдачи воды вторичного охлаждения и так далее.

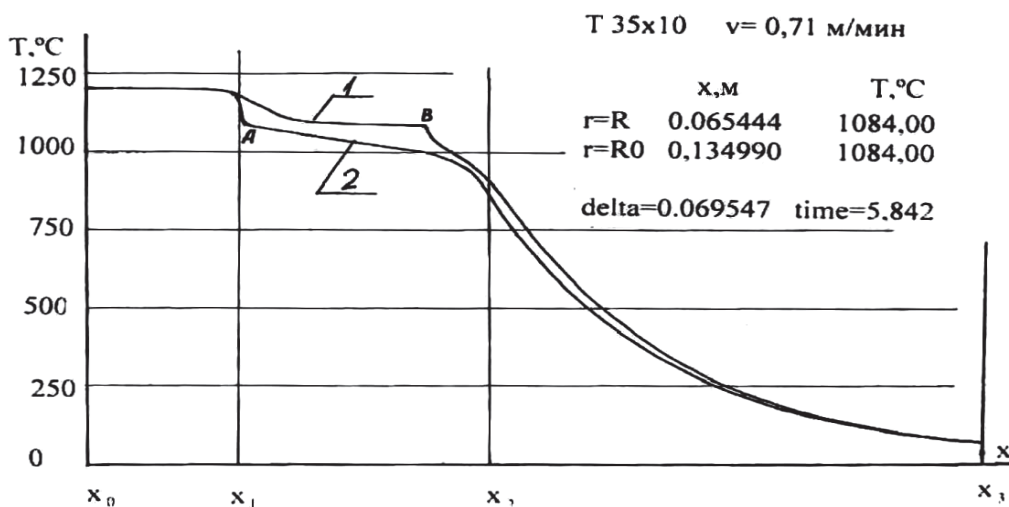


Рис. 3. Температура на внутренней (1) и наружной (2) поверхности медной трубной заготовки  $35 \times 10$  мм, отливаемой со скоростью 0,714 м/мин

Зависимость  $k = k(x)$  для этого случая очень похожа на ту, что изображена на рис. 2 для прутка диаметром 35 мм. Было произведено усреднение коэффициента теплопередачи по формуле

$$\bar{k} = \frac{1}{x_B - x_A} \int_{x_A}^{x_B} k(x) dx$$

и с этим усреднённым значением  $\bar{k} = 2635$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) решили задачу Стефана для трубы  $35 \times 10$  мм, движущейся со скоростью 0,714 м/мин.

Ход температурных кривых на участке от A до B для усреднённой величины коэффициента теплопередачи практически ничем не отличался от изображённых на рис. 3. То же можно сказать и о форме лунки жидкого металла, а сравнение их глубины дало расхождение в 2 мм (0,069 547 и 0,067 477 м). Воздействие переменного и усреднённого коэффициентов теплопередачи на процесс кристаллизации практически одинаково.

### Сравнение расчётов с практикой литья

При отливке упомянутой трубной заготовки были произведены эксперименты, позволявшие определить координату дна лунки (точки B). Сопоставление расчётных и экспериментально найденных координат позволило оценить масштаб погрешности моделирования. Для диапазона скоростей литья от 0,3 до 0,8 м/мин расхождения составили от 3 до 8 мм при значениях расчётных координат 25 и 90 мм соответственно. Теплофизические характеристики материалов брались из справочников, теплопроводность графита применявшейся марки бралась из сопроводительных документов на поставленную партию.

## Сравнение результатов моделирования литья с решением задачи Стефана

Ранее был сделан вывод о практическом совпадении температурных полей на участке кристаллизации при моделировании литья и решении задачи Стефана. Поэтому не приходится ожидать качественных различий при отыскании других зависимостей, приведённых в статье [6].

Для случая литья трубной заготовки  $35 \times 10$  мм были построены зависимости глубины лунки и длительности фазового перехода от скорости литья (см. рис. 4). Характер зависимостей такой же, как при решении задачи Стефана, то есть при  $\alpha = \text{const}$  [6].

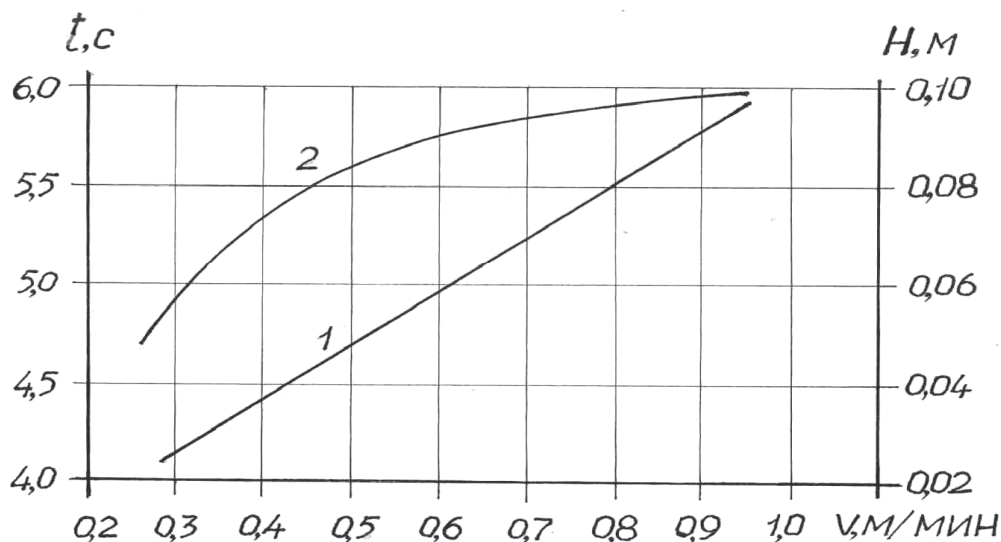


Рис. 4. Зависимость глубины лунки  $H$  и длительности фазового перехода  $t$  от скорости литья медной трубной заготовки  $35 \times 10$  мм: 1 –  $H$ , м; 2 –  $t$ , с

Рассчитанные по результатам моделирования скорости кристаллизации (затвердевания) меди при разных скоростях литья изображены на рис. 5.

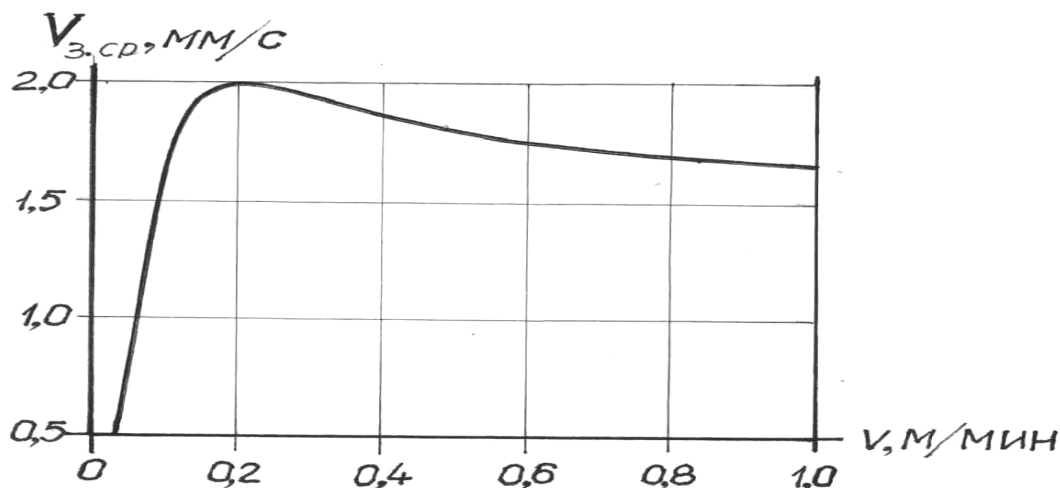


Рис. 5. Зависимость средней скорости затвердевания от скорости литья медной трубной заготовки  $35 \times 10$  мм

Сравнение рис. 4 – 5 показывает их однотипность – наличие максимума скорости затвердевания вначале и плоского участка в дальнейшем при росте скорости литья.

### **Выводы**

1. Получены формулы для нахождения коэффициентов теплопередачи в установке непрерывного горизонтального литья от жидкого состояния до остывающей на воздухе затвердевшей заготовки. Показано, что процесс фазового перехода совершается в условиях растущей воздушной прослойки на пути теплового потока, то есть в условиях существенного уменьшения коэффициента теплопередачи.

2. Несмотря на это имеет место линейная зависимость глубины лунки жидкого металла от скорости литья как при постоянстве коэффициента теплопередачи. Это определяет и характер поведения таких зависимостей от скорости литья, как длительность фазового перехода, средняя скорость кристаллизации – характер такой же, как при постоянном коэффициенте теплопередачи.

3. Действие переменного коэффициента теплопередачи на участке кристаллизации тождественно действию постоянного коэффициента теплопередачи, равного средней величине переменного.

4. При моделировании работы действующей установки непрерывного горизонтального литья получается хорошее приближение модельных процессов к реальным, что позволяет достаточно точно определить расположение лунки в графитовой втулке кристаллизатора, уверенно выбирать режимы литья: скорость, температуру расплава, интенсивность охлаждения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гордов, А. Н. Основы пирометрии / А. Н. Гордов. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
2. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
3. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомол. – М.: Энергия, 1975.
4. Кац, А. М. Анализ способов оптимизации процесса горизонтального литья / А. М. Кац // Цветные металлы. Металлообработка. – 1997. – № 3.
5. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
6. Попов, Э. И. Решение задачи Стефана для металла, движущегося в охлаждающей среде / Э. И. Попов, Ю. М. Репин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № I-1(21).



Гостищев В. В., Ри Э. Х., Ким Е. Д., Химухин С. Н., Ри Хосен  
V. V. Gostishchev, E. H. Ri, E. D. Kim, S. N. Khimukhin, Hosen Ri

## ПОЛУЧЕНИЕ ЛИГАТУРЫ НА ОСНОВЕ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА МЕТОДОМ АЛЮМИНОТЕРМИИ

## OBTAINING THE ALLOY BASED ON THE SHEELITE CONCENTRATE BY THE ALUMINOTHERMAL METHOD

**Гостищев Виктор Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Конструкционные и инструментальные материалы» Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; 89145450026. E-mail: V-gostishev@mail.ru.

**Mr. Viktor V. Gostishchev** – PhD in Engineering, Senior Researcher, Laboratory for Structural and Tooling Materials, Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre at the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 153, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; 89145450026. E-mail: V-gostishev@mail.ru.

**Ри Эрнст Хосенович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; 89242024953. E-mail: erikri999@mail.ru.

**Mr. Ernst H. Ri** – Dr. of Engineering, Professor, Head of the Department of Foundry Engineering and Metal Technology, Pacific National University (Khabarovsk, Russia); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042, Khabarovsk; 89144048877. E-mail: erikri999@mail.ru.

**Ким Евгений Давидович** – аспирант Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; 89141920709.

**Kim Mr. Eugenie D. Kim** – a post graduate student of Pacific National University (Khabarovsk, Russia); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; 89141920709.

**Химухин Сергей Николаевич** – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Конструкционные и инструментальные материалы» Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; 89242030609. E-mail: ximuxin@yandex.ru.

**Mr. Sergey N. Khimukhin** – Dr. of Engineering, Head of the Laboratory for Structural and Tooling Materials, Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre at the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russia); 153, Tikhookeanskaya Str.; Khabarovsk 680042; 89242030609. E-mail: ximuxin@yandex.ru.

**Ри Хосен** – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; 89144048877. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

**Mr. Ri Hosen** – Dr. of Engineering, Professor, Department of Foundry Engineering and Metal Technology, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; 89144048877. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

**Аннотация.** При использовании алюминотермического восстановления шеелитового концентрата совместно с оксидами ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ) получена лигатура, среднее содержание компонентов в которой составляет, % масс.: W – 46; Mo – 33; Cr – 20. Проведенной термодинамической оценкой и термографическим анализом алюминотермических реакций показана возможность процесса восстановления оксидов. Экспериментально установлены концентрации составляющих исходной шихты, при которых обеспечивается выход металла в слиток в интервале от 82 до 87 % масс. При переменном содержании алюминия и фиксированном содержании флюсов максимум выхода металла соответствует избытку восстановителя (Al) ~12 % масс. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что все структурные составляющие лигатуры содержат W, Mo, Cr в различных соотношениях. При высоком содержании W соответствующий структурный элемент имеет глобулярную форму.

**Summary.** In the process of aluminum-thermal reduction of scheelite concentrate with the oxides ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ), an alloy has been obtained, with the average component content % W – 46; Mo – 33; Cr – 20. Conducted thermodynamic evaluation and thermographic analysis of aluminothermal reactions prove the possibility of the oxides reduction process. The concentrations of the starting charge, which can provide metal output in ingot at the range from 82 to 87 %, have been experimentally established. In the conditions of variable fuel consumption and fixed flux content, the fuel maximum corresponds to the excess of reducing agent (Al) ~ 12 % by weight. The micro-X-ray spectral analysis has revealed that all the structural components of the alloy contain W, Mo, Cr in different ratios. With a high content of W, the corresponding structural element has a globular shape.

**Ключевые слова:** лигатура, шеелитовый концентрат, металлотермический синтез.

**Key words:** an alloy, scheelite concentrate, metallothermal synthesis.

*Работа выполнена при поддержке ГЗ № 11.3014.2017ПЧ*

УДК 669.71.621.74

### **Введение**

Одним из приоритетных направлений современного машиностроения является разработка теоретических основ и создание технологий, позволяющих повысить надежность и долговечность деталей машин и механизмов, работающих в сложных условиях эксплуатации. Решение указанной проблемы предусматривает применение металлов и сплавов, обладающих комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств: прочностью, ударной вязкостью, пластичностью, износостойкостью, жаро- и коррозионностойкостью и др. Для получения сплавов заданного состава используются разнообразные лигатуры, содержащие в своем составе определенное соотношение компонентов, определяющих достижение заданного комплекса свойств. При этом давно наметившаяся тенденция использования комплексных по составу лигатур позволяет повысить эффективность промышленного производства всей продукции металлургии. Зачастую современные лигатуры в своем составе содержат элементы, предназначенные не только для собственно легирования, но и для модифицирования – влияния на свойства сплава без изменения его элементного состава [1]. Проследившая основные направления развития производства комплексных лигатур, необходимо отметить наметившуюся тенденцию по получению лигатур, содержащих редкоземельные металлы (РЗМ). Использование РЗМ позволяет обеспечить ряд свойств сплавов, которые обеспечить при использовании обычных лигатур невозможно. Ученым и практикам металлургам давно известны уникальные модифицирующие возможности, которые обеспечивают введение в сплавы РЗМ содержащих лигатур [2], однако стоимость производства РЗМ зачастую сдерживала широкое их использование. Учитывая наблюдающееся в последнее время снижение стоимости РЗМ, производство РЗМ содержащих лигатур будет возрастать. Поэтому актуальной задачей современной металлургии является разработка инновационных технологий получения комплексных лигатур, которые могут использоваться в качестве основы для введения в их состав РЗМ.

В настоящее время лигатуры в основном получают алюминотермическим, силикотермическим и углетермическим способом с использованием различных плавильных агрегатов. Эти способы широко применяются в традиционной металлургии и позволяют производить сплавы большинства конструкционных и инструментальных материалов [3, 4]. Менее распространен процесс получения лигатур методом внепечной алюминотермии, при котором химические реакции восстановления протекают за счет экзотермического тепла, выделяющегося при взаимодействии алюминия с оксидами. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к использованию этого метода для получения ферросплавов и лигатур, включая популярные в настоящее время современные интерметаллидные сплавы на основе никеля. Известны эксперименты с использованием для легирования никелидов алюминия лигатуры, содержащей W, Mo, Cr [5]. Таким образом, необходимо получение базовых сплавов лигатур для их использования в качестве основы для добавки в различные сплавы.

Кроме этого, в условиях дальневосточного региона, обладающего большими запасами минерального сырья, работы, направленные на создание сложных лигатур внепечным процессом при использовании рудных концентратов, приобретают особую актуальность.

Цель настоящей работы заключается в получении комплексной лигатуры алюминотермическим совместным восстановлением рудного концентрата вольфрама, оксидов молибдена и хрома для последующего использования ее в качестве основы РЗМ добавок.

### Материалы и методика исследования

Исходным сырьем для получения сплавов служил шеелитовый концентрат (см. табл. 1) с добавками оксидов хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 98,6 % и молибдена  $\text{MoO}_3$  – 98,5 %. В качестве восстановителя применялся алюминиевый порошок (АП-1) с размером частиц 50 мкм. Термитной добавкой являлась натриевая селитра ( $\text{NaNO}_3$ ), а плавиковый шпат использовался в качестве флюса ( $\text{CaF}_2$ ).

Таблица 1

Фазовый состав шеелитового концентрата

$\text{WO}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	$\text{TiO}_2$
55,0	19,8	5,3	7,96	4,0	0,1	0,5

Шихту готовили посредством смешивания компонентов в расчетных массовых соотношениях. Выплавку сплавов проводили в воздушной среде внепечным способом в футерованных металлических тиглях. Для инициирования реакции применяли электрозапал, что позволяет проводить поджиг дистанционно. После окончания реакции и охлаждения слитки лигатуры извлекались из тигля и анализировались. Первоначальный контроль проводили визуально-оптическим методом с оценкой пористости, наличия оксидных плен и включений шлака. Затем исследовали элементный и фазовый состав слитков. Для изучения структуры материала и распределения концентрации составляющих элементов методом микрорентгеноспектрального анализа использовали растровый электронный микроскоп SU-70 Hitachi с соответствующими приставками (EDX и WDX). Изучение элементного состава исходных и полученных материалов проводили с использованием МАКС – GV. Рентгеноструктурный анализ образцов производили на дифрактометре Дрон-7 по стандартной методике.

### Результаты и обсуждение

Процесс получения комплексной лигатуры из оксидов металлов может быть представлен в виде суммы частных реакций восстановления отдельных компонентов. Принципиальную возможность получения металла в результате проведения металлотермической реакции оценивали на основании рассчитанной величины изменения свободной энергии ( $\Delta G$ ) исходя из теплоты образования ( $Q$ ) и адиабатической температуры ( $T_{ад}$ ). Результаты определения термодинамических параметров алюминотермических реакций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры алюминотермических реакций

Реакции восстановления оксидов металлов	$T_{ад}$ , К	$Q$ , кДж/моль	$\Delta G$ , кДж/моль	Расход алюминия, кг/кг оксида
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$	3200	536	-524	0,335
$\text{MoO}_3 + 2\text{Al} = \text{Mo} + \text{Al}_2\text{O}_3$	3800	930	-914	0,375
$\text{WO}_3 + 2\text{Al} = \text{W} + \text{Al}_2\text{O}_3$	3900	835	-819	0,233

Результаты определения температурной зависимости изобарного потенциала реакций восстановления оксидов хрома, молибдена и вольфрама показывают, что значения потенциалов лежат в области, благоприятной для образования сплавов этих металлов (см. рис. 1). При этом в первую очередь в металлическую фазу переходят термодинамически менее устойчивые оксиды ( $\text{WO}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ). Трудно восстанавливаемый оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  осложняет получение сплава, так как различие в скоростях восстановления отдельных компонентов шихты может явиться причиной снижения интенсивности горения шихты. При стехиометрическом соотношении  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}$  в условиях внепечного процесса хром восстанавливается недостаточно полно, в отличие от вольфрама и молибдена.

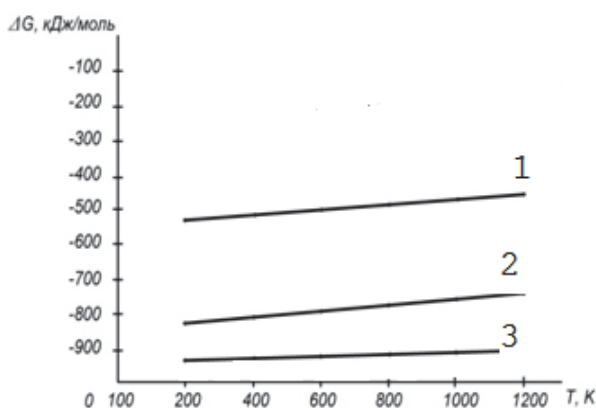


Рис. 1. Температурная зависимость потенциала Гиббса алюминотермического восстановления оксидов хрома (1), вольфрама (2), молибдена (3)

Восстановление оксидов металлов алюминием охарактеризовано методом дифференциального термического анализа (ДТА). Результаты экспериментов по термографированию смесей оксидов некоторых металлов с алюминием в стехиометрических соотношениях представлены на рис. 2.

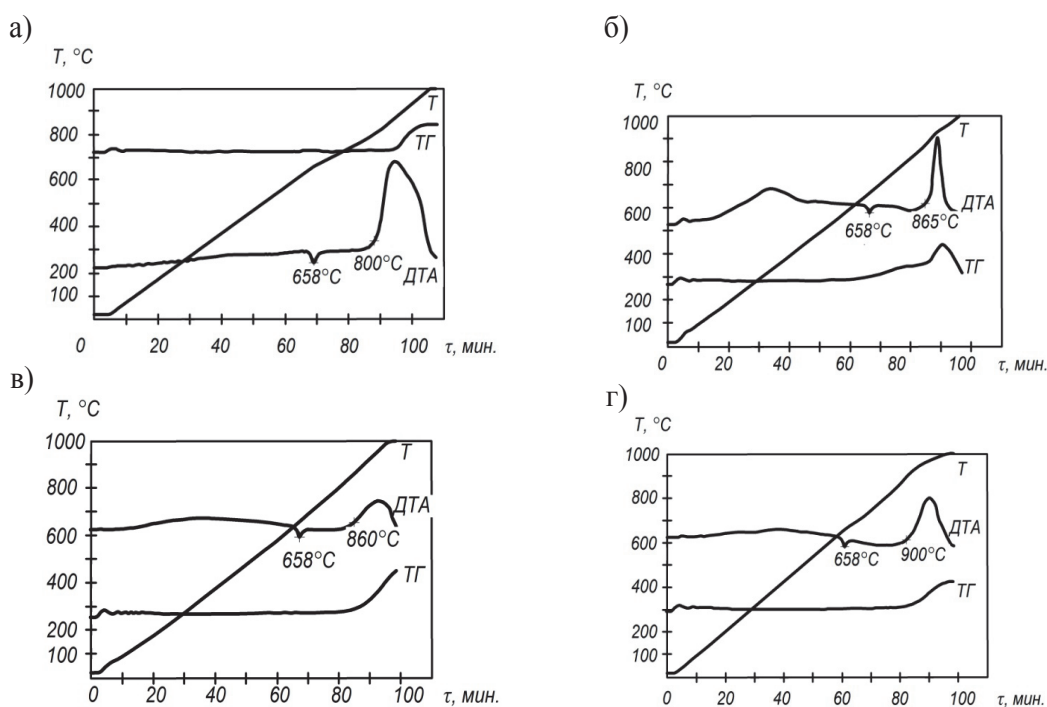


Рис. 2. Термограммы превращений в металлотермических системах:  
 а –  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}$ ; б –  $\text{MoO}_3 - \text{Al}$ ; в –  $\text{WO}_3 - \text{Al}$ ; г –  $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{MoO}_3 - \text{WO}_3 - \text{Al}$

При нагревании в атмосфере воздуха на кривых ДТА наблюдаются два эффекта:

- 1) эндотермический при температуре плавления алюминия;
- 2) экзотермический, отвечающий взаимодействию алюминия с оксидом металла.

При этом восстановление оксидов вступает в активную фазу после расплавления алюминия при температуре ~ 650 °С и протекает по гетерогенному механизму в интервале 800 – 1100 °С.

Таким образом, термодинамическая оценка и термический анализ металлотермических систем показывает, что при совместном восстановлении оксидов металлов речь может идти о получении сплавов вольфрама, молибдена и хрома.

На основании данных табл. 2 была установлена минимально необходимая дозировка алюминия – основного компонента шихты. Для успешного хода металлотермической реакции необходимо обеспечить определенный тепловой эффект, достаточный для расплавления компонентов шихты и получения продуктов восстановления. Практикой установлено, что лучшие результаты в алюминотермической реакции достигаются при величине удельного теплового эффекта около 3000 кДж/кг. При этом следует учитывать, что в условиях внепечного процесса, когда тепло отводится через стенки тигля, потери могут достигать 30 % от теплового эффекта металлотермической реакции. Шихта, составленная на основании получения необходимого стехиометрического соотношения компонентов, недостаточно термична: выделившееся в ходе металлотермического процесса тепло не обеспечивает достаточную температуру расплавления и расслаивания слитка на металлическую и шлаковую фазу.

Повышение теплового эффекта достигают путем введения в реакционную смесь тепловыделяющих добавок:  $KClO_3$ ,  $NaNO_3$ ,  $CaSO_4$ ,  $BaO_2$ ,  $Al_2(SO_4)_3$ . Так, например, удельный тепловой эффект разложения  $NaNO_3$  достигает значения 14 000 кДж/кг. Введение в металлотермическую смесь 8 – 10 масс.% натриевой селитры приводит к возрастанию суммарного теплового эффекта, достаточного для нормального течения процесса и расплавления металлической и шлаковой фаз.

Для улучшения условий формирования сплава в компактном виде вводят флюсы, снижающие температуру плавления и вязкость расплава, способствующие более полному осаждению металла. В качестве флюсующих добавок использовали  $CaO$  и  $CaF_2$ , количество которых определяли исходя из расчета получения в шлаке соотношения  $CaO/Al_2O_3$ , равного 0,2 – 0,4.

С целью корректировки составов шихты для получения сложного сплава выполняли специальные эксперименты, в которых варьировали соотношение оксидов металлов с алюминием. Анализ результатов опытных плавов показал, что существует зависимость выхода металла от содержания алюминия в шихте.

При переменном содержании алюминия и фиксированном содержании флюсов максимум выхода металла соответствует избытку восстановителя ~12 % масс. В результате был найден состав шихты, при котором достигается максимальный выход металла (см. табл. 3). Продуктом алюминотермической плавки являлся многокомпонентный расплав, отчетливо разделенный на металлический слиток и находящийся на поверхности оксидный слой (шлак). Материал шлака представлен сложной оксидной системой, основными компонентами которого являются  $Al_2O_3$  и  $CaO$ , а также продукты неполного восстановления термодинамически устойчивых оксидов металлов. Необходимо отметить, что полученный шлак обладает повышенной твердостью и может быть рекомендован к дальнейшему использованию в качестве абразивного материала для металлообработки.

Таблица 3

Составляющие металлотермической системы и полученная лигатура

Массовая доля составляющих металлотермической системы				Состав лигатуры, масс.%				Выход металла, масс.%
$CaWO_4$	$MoO_3$	$Cr_2O_3$	Al	W	Mo	Cr	Примеси	
1	0,23	0,23	0,34	44,4	29,3	22,8	2,4	82
1	0,3	0,23	0,37	46,5	34,1	17,3	2,0	83
1	0,3	0,23	0,4	49,1	35,2	20,2	2,5	87

По данным рентгенофазового (см. рис. 3, а), микрорентгеноспектрального (см. табл. 4, 5) анализов полученная лигатура представляет собой многофазный материал, все структурные составляющие в своем составе содержат W. Отсутствие на дифрактограмме рефлексов, относящихся к Cr, объясняется его малой концентрацией в слитках. Для более детального исследования структурных составляющих полученных слитков использовали микрорентгеноспектральный анализ (см. рис. 3, б, в и табл. 4, 5). Предварительный анализ показал примерно сходное микроструктурное строение слитков. В основном микроструктурное строение слитков однородно (см. рис. 3, б), однако имеется небольшое количество локальных областей с несколько отличным структурным строением (см. рис. 3, в). Микрорентгеноспектральным анализом были изучены структурные составляющие слитков.

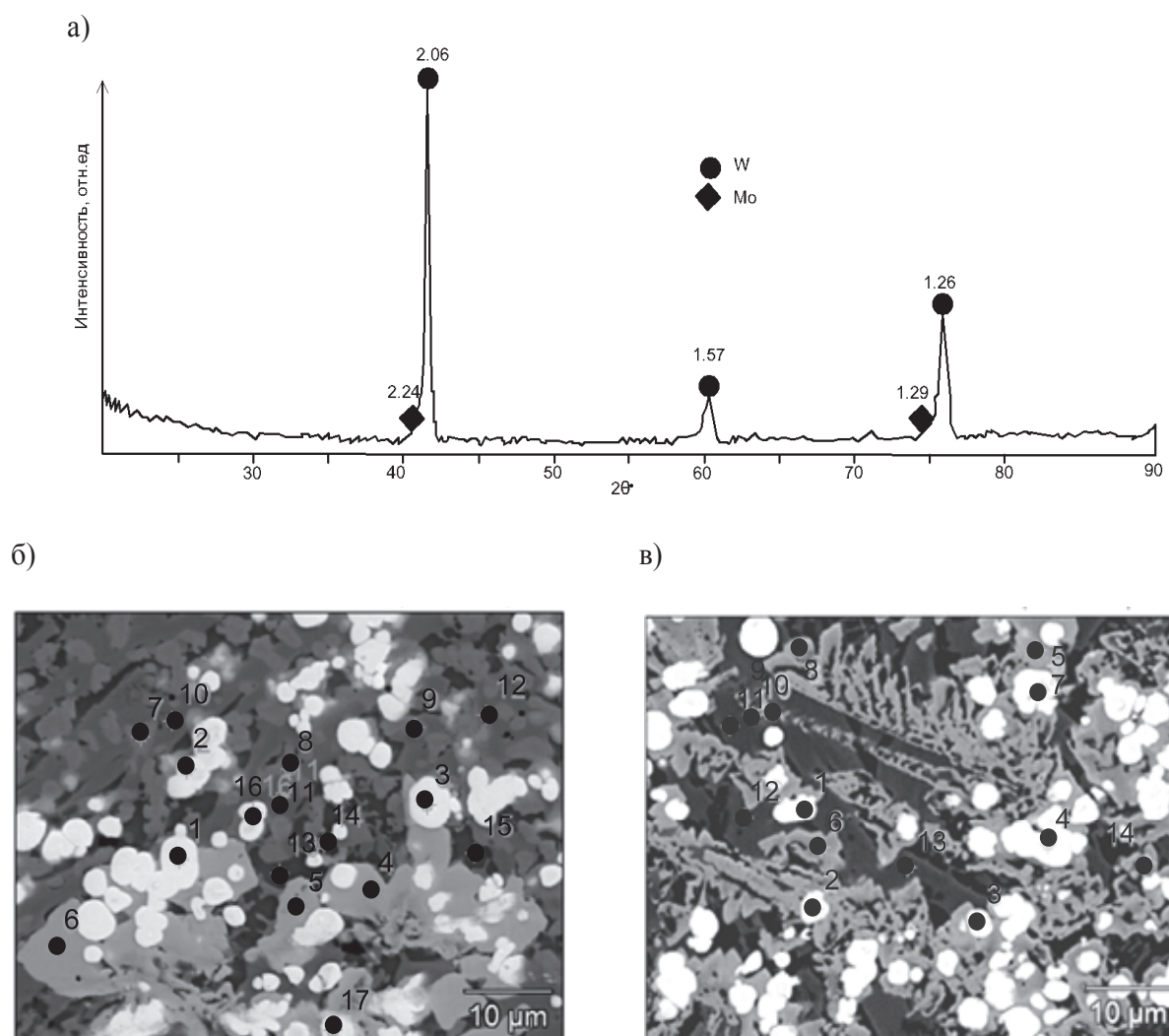


Рис. 3. Дифрактограмма и микроструктура лигатуры W-Mo-Cr: а – дифрактограмма слитка лигатуры; б – микроструктурное строение слитка; в – микроструктурное строение локальных областей в слитке

Как следует из полученных результатов, микроструктура лигатуры (см. рис. 3, б, в) состоит из фаз, отличающихся по составу и структуре. Структура в виде светлых локально расположенных фаз (см. рис. 3, б, точки 1-3, 16, 17 и рис. 3, в, точки 2 и 3) имеет форму, близкую к шаровидной. Указанная фаза содержит преимущественно W, легированный Mo, Cr и Al, среднее содержание компонентов в фазах (см. рис. 3, б, в) существенно не отличается. Светлая фаза, точки 1, 4, 7 (см. рис. 3, в) имеют форму, несколько отличающуюся от шаровидной. При этом в их составе

дополнительно (кроме W и Cr) содержатся примеси O, Al и Fe. Существенно отличающиеся по цветовому оттенку и форме фазы серого цвета содержат меньше W (см. рис. 3, б, точки 4-6 и рис. 3, в, точки 5, 6, 8). Другие фазы, более темного оттенка, содержат еще большее количество примесей и меньше W.

Таблица 4

Результаты анализа структурных составляющих в центральной части слитка

Точки анализа	Содержание элементов, масс.%						
	Al	Si	P	Cr	Fe	Mo	W
1	–	–	–	2,2	–	13,6	84,2
2	–	–	–	3,5	–	12,5	84,1
3	–	–	–	3,3	–	12,3	84,4
4	5,2	–	–	20,1	–	34,5	40,2
5	4,8	–	–	17,9	–	32,5	44,8
6	5,1	–	–	20,6	–	33,0	41,3
7	3,3	8,1	4,0	25,4	0,4	37,4	21,3
8	3,3	8,2	4,2	25,1	0,6	36,9	21,7
9	3,2	7,9	4,2	24,8	0,4	37,7	21,9
10	2,5	–	11,8	42,7	0,7	24,8	17,4
11	2,0	–	11,7	42,6	0,9	21,3	21,5
12	2,3	–	11,9	43,4	0,7	23,6	18,0
13	27,1	–	–	25,2	3,9	25,9	17,9
14	26,7	–	–	24,1	5,2	24,0	20,0
15	27,4	–	–	24,0	5,1	24,8	18,7
16	2,3	–	–	3,4	–	18,1	76,2
17	1,7	–	–	3,5	–	26,4	68,4

Таблица 5

Результаты анализа структурных составляющих в краевой части слитка

Точки анализа	Содержание элементов, масс.%							
	O	Al	Si	P	Cr	Fe	Mo	W
1	0,5	1,1	–	–	2,9	–	11,5	84,0
2	–	–	–	–	2,9	–	11,7	85,5
3	–	–	–	–	2,7	–	10,4	86,9
4	–	1,9	–	–	2,9	–	17,9	77,3
5	–	2,1	–	–	2,7	–	14,3	45,3
6	–	4,6	–	–	20,4	–	35,1	39,9
7	–	4,4	–	–	17,7	0,3	32,3	80,9
8	–	4,6	–	–	18,0	–	33,6	43,9
9	–	3,2	7,2	4,4	25,8	0,5	35,3	23,8
10	–	3,1	7,3	5,1	27,9	0,6	33,9	22,0
11	–	2,5	–	12,1	44,6	0,7	22,4	17,8
12	–	2,1	–	11,5	43,8	0,7	20,7	21,1
13	–	2,3	–	11,8	44,3	0,6	21,8	19,2
14	–	3,7	–	0,7	11,8	0,6	20,2	63,0

Таким образом фазовый состав структурных составляющих слитков в различных участках не различается, изменяется только их соотношение.

Исходя из формы структурных составляющих, с большой степенью достоверности можно утверждать о первоначальном формировании структур светлой фазы.

Отдельно необходимо отметить наличие в слитках примесей в виде Si и P, удаление которых необходимо предусмотреть в виде дополнительной обработки шеелитового концентрата перед проведением металлургического процесса.

#### **Выводы**

1. Аллюминотермическим восстановлением шеелитового концентрата и оксидов ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ) получена лигатура, среднее содержание компонентов в которой составляет % масс. W – 46; Mo – 33; Cr – 20.

2. Проведена термодинамическая оценка и выполнен термографический анализ аллюминотермических реакций, составляющих основу процесса восстановления для получения слитка лигатуры.

3. Установлен состав исходной шихты, при котором обеспечивается выход металла в слиток от 82 до 87 масс. %.

4. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что все структурные составляющие лигатуры содержат W, Mo, Cr в различных соотношениях.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кузнецов, М. А. Управление структурой и свойствами металлов методом модифицирования / М. А. Кузнецов, Д. Е. Колмогоров, Е. А. Зернин // Технология машиностроения. – 2012. – № 2. – С. 5-8.
2. Влияние лигатуры с алюминидом Ni и РЗМ на структуру и свойства силумина и сплава Al-Cu / Э. Х. Ри, Хосен Ри, М. А. Калаушин [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2016. – № 6. – С. 20-24.
3. Получение легированных никелидов алюминия металлургическим восстановлением оксидов металлов / В. В. Гостищев, И. А. Астапов, А. В. Середюк [и др.] // Известия вузов: Цветная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 63-69.
4. Механизм и кинетика кристаллизации тригонального карбида в низкохромистых чугунах при комплексном модифицировании / Хосен Ри, Г. С. Дзюба, М. А. Ермаков, Е. С. Мамонтова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Серия «Науки о природе и технике». – 2015. – № II-1(22). – С. 74-81.
5. Высокотемпературный синтез композитов на основе алюминидов никеля / В. В. Гостищев, И. А. Астапов, А. В. Середюк [и др.] // Неорганические материалы. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 464-467.



Полянская И. Л., Щукина В. Н.  
I. L. Polyanskaya, V. N. Shchukina

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

### INVESTIGATION OF MICROSCOPIC CORROSION DAMAGE

**Полянская Ирина Леонидовна** – кандидат технических наук Уральского государственного университета путей сообщения (филиал в г. Тюмени). E-mail: polyanskaya\_il@inbox.ru.

**Ms. Irina L. Polyanskaya** – PhD in Technical sciences, Ural State University of Railway Transport (A branch in Tyumen). E-mail: polyanskaya\_il@inbox.ru.

**Щукина Вера Николаевна** – кандидат технических наук, доцент Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень). E-mail: shukina82@mail.ru.

**Ms. Vera N. Shchukina** – PhD in Technical sciences, Associate Professor, Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen). E-mail: shukina82@mail.ru.

**Аннотация.** В статье представлены результаты металлографических исследований коррозионных изменений структуры углеродистой стали резервуаров для хранения нефтепродуктов и установлено обезуглероживание поверхности коррозионных повреждений на большой глубине от поверхностных слоев исследуемых стальных листов резервуаров. Анализ полученных результатов показал влияние углерода на коррозионную стойкость сталей резервуаров. При этом снижается гетерогенность стали, а вместе с этим и вероятность появления микрогальванических пар, что не исключает снижение скорости растворения стали.

**Summary.** The article presents the results of metallographic studies of corrosion changes in the structure of carbon steel tanks for storage of petroleum products and found decarburization of the surface of corrosion damage at great depth from the surface layers of the steel sheets of the tanks under investigation. The analysis of the obtained results showed the effect of carbon on the corrosion resistance of steels of tanks. This reduces the heterogeneity of steel and with it the probability of the appearance of microgalvanic pairs, which does not exclude a decrease in the dissolution rate of steel.

**Ключевые слова:** коррозия стали, металлографические исследования, микротрещина, гетерогенность, резервуар вертикальный стальной (PBC), гальваническая пара, ферритно-перлитная структура, структурная неоднородность, микрошлифы, обезуглероживание, пассивация железа, микроповреждения в днище, оксидная пленка, сегрегации углерода, коррозионные потери.

**Key words:** steel corrosion, metallographic studies, microcrack, heterogeneity, vertical steel reservoir (PBC), galvanic steam, ferritic perlite structure, structural heterogeneity, microsections, decarburization, iron passivation, microdamages in the bottom, oxide film, carbon segregation, corrosion losses.

УДК 669.111.35:539.4.015

#### Введение

В последнее время предлагается к использованию большое количество защитных покрытий для металлоконструкций PBC, прошедших тестирование в различных исследовательских центрах. Приводятся гарантии их безотказной работы до 40 лет. Принятие решений по применению того или иного способа связано с большими затратами, поэтому необходима полная уверенность в эффективности предлагаемых технологий.

Большая часть защитных покрытий зарубежных производителей ориентирована на западный рынок, поэтому фирмы-изготовители не делают корректировку на действующую в настоящее время отечественную нормативно-техническую документацию по ремонту и техническому освидетельствованию длительно эксплуатируемых PBC и климатические условия эксплуатации при

значительном сезонном перепаде температур. На основании этого возникла необходимость в проведении дополнительных исследований по данному вопросу.

Согласно действующей в настоящее время нормативно-технической документации допускается коррозия полотноща днища до 50 % его глубины, имеющей поверхностную коррозию разной глубины, которую не всегда удается устранить пескоструйной обработкой или преобразователями ржавчины [1; 2].

Решение проблемы эксплуатационной надежности защитных покрытий потребовало выполнения дополнительных исследований процессов, протекающих на внутренних поверхностях резервуаров.

#### **Методика проведения исследований**

Исследования выполнялись на образцах, изготовленных из ранее эксплуатировавшихся металлических пластин стали 09Г2С, используемой для изготовления резервуаров хранения нефтепродуктов.

Имевшиеся ранее коррозионные повреждения не превышали 1 – 1,5 мм глубиной.

Металлографическое исследование коррозионных повреждений листов стали 09Г2С нижнего пояса стенки и днища резервуара для хранения товарной нефти выполнялось на микроскопе МИМ-7 при увеличениях от 200 до 500 раз. Особое внимание уделялось сквозным язвам и повреждениям, составлявшим более половины толщины листа. Исследовали микрошлифы не только внутренней, но и наружной поверхности стального листа на полированных пастой ГОИ и травленных 4-процентным раствором азотной кислоты.

Твердость исследуемых образцов измеряли твердомером ПМТ-3.

Данные, полученные при изучении микроструктуры образцов, подтверждают, что изменения проходят на уровне тончайших микроскопических структур.

Для оценки изменений применяли качественный и количественный анализ.

Качественный анализ микроструктуры включал в себя оценку таких показателей, как форма, размер и границы зерен фаз.

Количественный структурный анализ включал определение процентного содержания этих зерен путем вычисления занимаемой ими площади методом точечного счета. Исследования проводились в пяти партиях образцов. Подсчет проводили в пяти полях зрения шлифах из каждой опытной партии [3].

#### **Результаты исследований**

Металлографические исследования, помимо микродефектов на макроскопических коррозионных повреждениях, позволили установить другой интересный факт – обезуглероживание поверхности значительной части коррозионных повреждений. По-видимому, отмеченный факт не является следствием горячей прокатки стали при изготовлении, так как обезуглероживание обнаружено на достаточно большом расстоянии от первоначальной поверхности (более 1 – 2 мм).

Исходные листы стали 09Г2С имели ферритно-перлитную структуру (см. рис. 1) с различным количеством ферритной составляющей в различных областях, где некоторая структурная неоднородность, провоцирующая повышенные коррозионные потери.

а)



б)

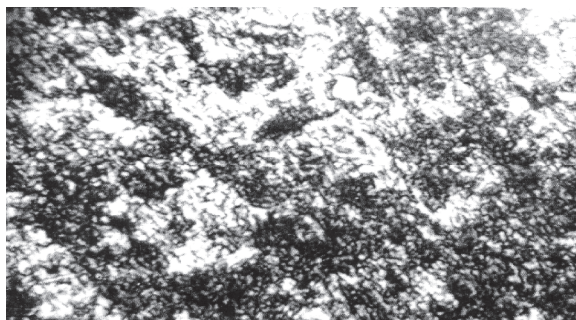


Рис. 1. Ферритно-перлитная структура стальных листов 09Г2С после травления нитратом (ув. в 345 раз)

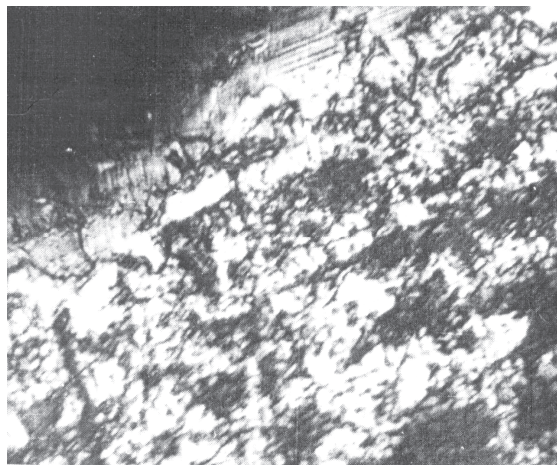
На участках листа с макроскопическими повреждениями на глубине 1 мм сохранилась эта же ферритно-перлитная структура (см. рис. 2).



Рис. 2. Структура поверхности листов стали 09Г2С с малыми коррозионными повреждениями после обработки ниталем (ув. в 345 раз)

На участках листа со значительными коррозионными язвами обезуглероживания в результате в поверхностном слое сформировалась лишь одна структурная составляющая – феррит (см. рис. 3).

а)



б)



Рис. 3. Обезуглероженный участок поверхности коррозионной язвы на днище резервуара: а, б – микроязвы на внутренней стороне днища различного диаметра. Травление ниталем (ув. в 345 раз)

При этом средняя микротвердость при нагрузке на индентор твердомера 1,96 Н уменьшается с 1886,7 МПа (исходная ферритно-перлитная структура) до 1373,3 МПа на внутренней стороне листа и до 1648,4 МПа на внешней (измерения выполнялись как для листов днища, так и для листов стенки). Здесь же могут и присутствовать и микроязвы (см. рис. 3, б).

В качестве иллюстраций на рис. 4 представлены отпечатки алмазного наконечника индентора твердомера. По нашим оценкам величина обезуглероженного слоя поверхности микроязв колеблется от 49 до 243 мкм.

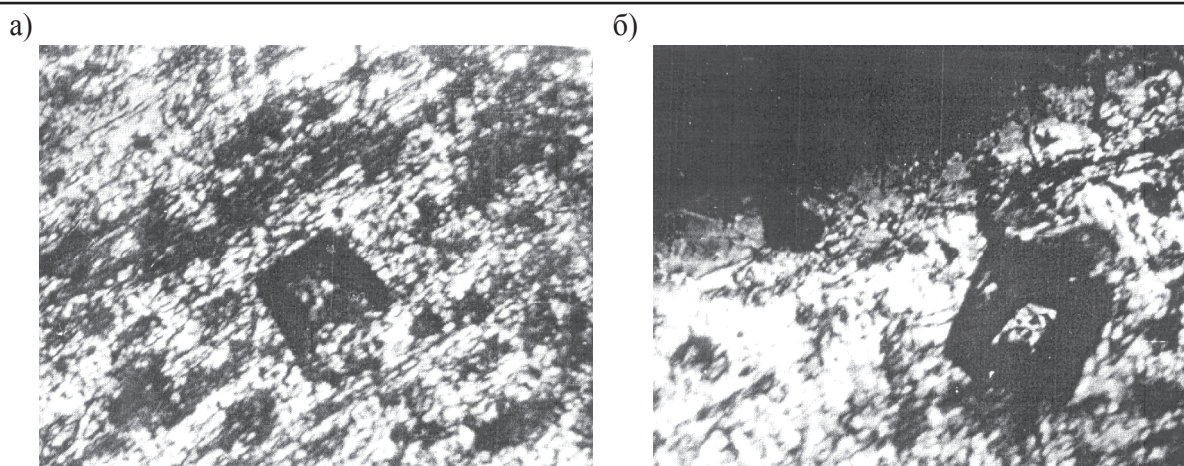


Рис. 4. Отпечатки алмазного наконечника прибора ПМТ-3: а – в центре стального листа; б – в обезуглероженном слое язвы глубиной до 4,5 мм на днище резервуара.  
Травление ниталем (ув. в 345 раз)

По поводу влияния углерода на коррозионную стойкость сталей у различных авторов нет единого мнения. Так в работе [4, 13] указано, что содержание углерода не оказывает никакого влияния на коррозию стали в воде, но в морской воде повышение концентрации углерода вызывает незначительное увеличение скорости коррозии.

В монографии [5] отмечено, что углерод может повышать и понижать скорость окисления у стали в атмосферных условиях и в нейтральных водных растворах; в кислых средах повышение содержания углерода заметно снижает коррозионную стойкость исследуемой стали. Даже приведенные в одной и той же работе [6; 7; 14] данные свидетельствуют о противоположном влиянии углерода на кинетику атмосферной коррозии в городских сельских и промышленных условиях (сравнение первого, второго экспериментов с третьим, четвертым экспериментами) (см. табл. 1).

Таблица 1

## Кинетика атмосферной коррозии

Эксперимент	Серия образцов	Содержание стали, %						Коррозионные потери		
		C	Mn	Si	Cu	P	S	Городские, 1050 дней	Промышленные, 1080 дней	Сельские, 1063 дней
1	11320,31	0,1	–	–	0,12	0,013	0,032	759	1431	613
2	11378,11	0,045	–	–	0,13	0,011	0,025	754	1375	590
3	12020,1	0,12	0,71	0,24	0,08	0,015	0,017	660	1280	535
4	12050,1	0,58	0,61	0,25	0,10	0,015	0,020	568	1250	46

Такие пассивации железа разногласия обусловлены тем, что углерод уменьшает потенциал и коррозионный ток пассивации железа [8; 9], облегчая образование защитной оксидной пленки, снижающей скорость коррозии в несколько раз в зависимости от ее состава и строения. Однако при нарушении сплошности такой пленки на поверхности стали возникают гальванические пары, и растворение металла интенсифицируется даже по сравнению с чистым железом [10].

Кроме того, наличие углерода в стали (и других элементов) приводит к возникновению неоднородностей (сегрегаций), усиливающих коррозионные повреждения за счет образования многочисленных микрогальванических пар. В целом с термодинамической точки зрения отсутствие

углерода (и других элементов) повышает гомогенность металла и снижает вероятность появления микрогальванических пар на поверхности, а с нею и скорость коррозии [11].

## Выводы

Обезуглероживание коррозионных повреждений является следствием самоорганизации корродирующей системы, стремящейся уменьшить свои потери [12]. По мере обезуглероживания снижается гетерогенность стали, а с нею вероятность появления и микрогальванических пар – в итоге скорость растворения в стали должна уменьшаться. Однако коррозионная язва продолжает расти вглубь, где еще сохранился перлит.

Таким образом, самоорганизация координирующей поверхности требует более детального изучения с постановкой лабораторных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Березин, В. Л. Прочность и устойчивость резервуаров / В. Л. Березин, В. Е. Шутов. – М.: Недра, 1973. – 200 с.
2. Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
3. Полянская, И. Л. Сталь 95X18Ши влияние на ее свойства тепловой вакуумной обработки: сб. науч. тр. ТюмГАСУ за 2014 год. В 2 т. Т. 1 / И. Л. Полянская, И. В. Шушарина. – Тюмень: РИО ТюмГАСУ, 2014. – С. 103-106.
4. Малахов, А. И. Основы металловедения и теории коррозии / А. И. Малахов, А. П. Жуков. – М.: Высш. шк., 1987. – 192 с.
5. Веденкин, С. Г. Коррозия и защита металлов / С. Г. Веденкин. – М.: Metallurgizdat, 1952. – 72 с.
6. Кусков, В. Н. Совершенствование раскисления с учетом влияния раскисления на структурную однородность жидкой и высокотемпературное окисление твердой сталей: дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Кусков. – Свердловск, 1984. – 166 с.
7. Правила безопасности при эксплуатации магистральных нефтепроводов. – М.: Недра, 1989. – 125 с.
8. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. – М.: Недра, 1988. – 245 с.
9. Саакиян, Л. С. Повышение коррозионной стойкости нефтегазопромыслового оборудования / Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, И. А. Соболева. – М.: Недра, 1988. – 211 с.
10. Сафарян, М. К. Металлические резервуары и газгольдеры / М. К. Сафарян. – М.: Недра, 1987. – 144 с.
11. Шлугер, М. А. Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. – М.: Высш. шк., 1972. – 216 с.
12. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Тарасенко. – Тюмень, 1991. – 254 с.
13. Галеев, В. Б. Эксплуатация стальных вертикальных резервуаров в сложных условиях / В. Б. Галеев. – М.: Metallurgiya, 1964. – С. 31-34.
14. Полянская, И. Л. Биологическая коррозия строительных конструкций / И. Л. Полянская, В. А. Кораблев, Д. Д. Байнашев // Молодежь Сибири – науке России: Сибирский институт бизнеса, управления и психологии. Союз студентов Сибири. Красноярское региональное отделение общероссийской общественной организации «Национальная система развития научной, творческой и инновационной деятельности молодежи России «Интеграция»: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск: РИО ГОУ ВПО Сибирский институт бизнеса и предпринимательства, 2008. – С. 59-63.

Кузьмичев Е. Н., Николенко С. В., Евстигнеев А. И., Балахонов Д. И.  
ПОЛУЧЕНИЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЫ НА ШЕЕЛИТОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ

Кузьмичев Е. Н., Николенко С. В., Евстигнеев А. И., Балахонов Д. И.  
E. N. Kuzmichev, S. V. Nikolenko, A. I. Evstigneev, D. I. Balakhonov

## ПОЛУЧЕНИЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЫ НА ШЕЕЛИТОВЫЙ КОНЦЕНТРАТ

## OBTAINING TUNGSTEN CARBIDE BY PLASMA AFFECTING ON SHEELITE CONCENTRATE

**Кузьмичев Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Локомотивы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 8(4212)407-076. E-mail: e\_kuzmichev@mail.ru.

**Mr. Evgeny N. Kuzmichev** – PhD of Engineering, Associate Professor, Locomotive Department Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 8(4212)407-076. E-mail: e\_kuzmichev@mail.ru.

**Николенко Сергей Викторович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник учреждения Российской академии наук Института материаловедения ХИЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153. E-mail: nikola1960@mail.ru.

**Mr. Sergey V. Nikolenko** – Doctor of Engineering, Leading research officer Institute of Materials Science, the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk region, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya Str. E-mail: nikola960@mail.ru.

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, советник при ректоре Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: msf@knastu.ru.

**Mr. Alexey I. Evstigneev** – Doctor of Engineering, Professor, Rector's Adviser, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: msf@knastu.ru.

**Балахонов Денис Игоревич** – аспирант кафедры «Локомотивы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: karoxar@mail.ru.

**Mr. Denis I. Balakhonov** – Post-graduate Student Locomotive Department Far East State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk region, Khabarovsk, 47 Seryshev Str. E-mail: karoxar@mail.ru.

**Аннотация.** В результате синтеза вольфрамсодержащего многокомпонентного минерального сырья с применением энергий высокой плотности получен вольфрам и карбиды вольфрама. Также в статье приводятся результаты экспериментов о возможности применения энергий высокой плотности при синтезировании функциональных материалов для промышленного использования.

**Summary.** We produced tungsten and tungsten carbide as a result of the synthesis of multicomponent tungsten mineral resource with the employment of high density energy flow. The results of experiments concerned with the possibility of using high-density energy to synthesize functional materials for industrial use are presented as well.

**Ключевые слова:** шеелитовый концентрат, энергия высокой плотности, плазма, вольфрам, карбид вольфрама.

**Key words:** scheelite concentrate, high-density energy, plasma, tungsten, tungsten carbide.

УДК 621.762.24:544.556.1

### Введение

Комплексное использование многокомпонентного минерального сырья с применением концентрированных потоков энергии (плазмы или лазерного луча), исключаящих гидрометаллургическую переработку, является наиболее перспективным направлением исследований в области

современного материаловедения. Получаемые в результате функциональные материалы и покрытия могут отличаться особыми свойствами от уже известных материалов, получаемых по классическим технологиям, и, как правило, они имеют более низкую себестоимость и более безопасны в производстве [1; 2; 3].

Примером подобных технологий является экстрактивная металлургия с применением высокотемпературной дуговой плазмы. Известны исследования переработки циркониевого минерального сырья, отчистки кремния и других химических элементов от примесей и т.д. [4].

Обработка плазмой применяется в экстрактивной металлургии вольфрама и молибдена, при которой происходит выделение дисперсных порошков вольфрама и молибдена из аммонийных солей вольфрамовой и молибденовой кислот [5]. Плазма используется при получении карбида вольфрама из оксида вольфрама  $WO_3$  с использованием различных смесей газа [1; 5].

Однако использование плазменных технологий для получения функциональных материалов и покрытий непосредственно из оксидосодержащего минерального сырья и по сей день носит неоднозначный характер. Имеются публикации, исследующие вопросы переработки различных руд и рудных концентратов, направленных на разрушение кристаллической решетки минерала с целью облегчения химического выделения извлекаемого элемента и обеспечения полноты его извлечения [6; 9 – 11].

В данной статье приводятся результаты исследований по переработке шеелитового концентрата, входящего в состав шихты, где воздействие производится потоком энергии высокой плотности – плазмой порядка  $g > 10^3 - 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

Целями исследований являются: получение вольфрама и его тугоплавких соединений  $W_nC_n$  из оксида, входящего в состав многокомпонентного минерального сырья с содержанием вольфрама порядка 35 – 55 %, а также проведение макроскопического и микроскопического анализов получаемых образцов; исследование процессов, протекающих при синтезе в камере реактора, для дальнейшей оптимизации показателей плазмы и состава шихты.

### Методика и материалы

Для проведения опытов по переработки вольфрамсодержащего минерального сырья – шеелита (Ш) (см. табл. 1) – была разработана методика эксперимента и собрана экспериментальная установка (см. рис. 1), на которой производился синтез соединений вольфрама с углеродом.

Таблица 1

Химический состав шеелитового концентрата

Содержание компонентов в концентрате, масс. %								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
7,96	0,78	5,29	0,72	0,02	19,8	2,45	0,18	0,17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	As	TiO <sub>2</sub>	WO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	–
4,9	0,45	0,25	55,4	0,1	0,68	1,56	0,43	–

Основной проблемой получения функциональных материалов из оксидосодержащего минерального сырья является разрушение оксида на первоначальном этапе обработки. Для этого в шихту добавляется восстановитель. На втором этапе необходимо сформировать условия для синтеза тугоплавких соединений карбида вольфрама, подобрать необходимые показатели плазмы и контролировать их.

В экспериментах в качестве восстановителя и карбидизатора использовался графит. Было высказано предположение, что при воздействии высокочастотной плазмой процесс восстановления W и его последующая карбидизация происходит в один технологический цикл. В ранних работах других авторов данная тенденция была прослежена с чистым оксидом вольфрама  $WO_3$  [1; 3].

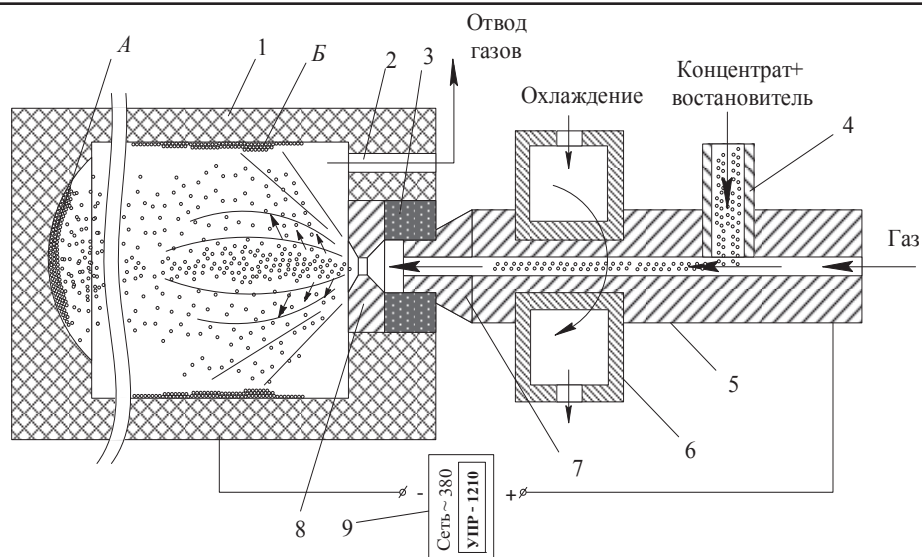
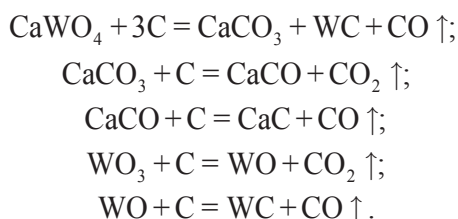


Рис. 1. Схема установки по переработке многокомпонентного минерального сырья: 1 – камера реактора; 2 – канал отвода газов и рабочей камеры; 3 – диэлектрическое кольцо; 4 – трубка подвода порошковой смеси; 5 – держатель катода; 6 – радиатор охлаждения держателя катода; 7 – катод с вольфрамовым наконечником; 8 – сопло; 9 – установка УПР-1210

При попадании в дугу плазмы шихты, состоящей из шеелита и углерода, кристаллическая решётка основного минерала разрушается, а углерод вступает в химические реакции с каждым элементом по следующим известным уравнениям реакции и т.д.:



Химические элементы, попадающие в плазму разряда, испытывают воздействие различных факторов (температура, давление, скорость плазменного потока), способствующих ускорению процесса химического синтеза соединений. Плазменный поток является достаточно плотной «сплошной» средой и может быть представлен как жидкость.

Отличительная особенность плазмы от жидкости состоит в свойстве сжимаемости, а также в хорошей проводимости электрического тока, близкой к проводимости металлов. Наличие токов в плазменном разряде приводит к образованию электромагнитного поля. Движение плазмы, как проводящей жидкости в электрическом и магнитном полях, подчиняется законам магнитной гидродинамики.

В настоящее время достаточно подробно изучена природа движения частиц (атомов, нейтронов и т.д.) в плазме, описаны волновые явления, где поток плазмы есть не что иное, как составляющая продольных и поперечных, альвеновских и магнитозвуковых волн [7].

В разработанной модели эксперимента частицы шеелита и углерода, вводимые в плазменный разряд, испытывают влияние всех вышеперечисленных факторов. Таким образом, движение всех частиц в плазменном разряде хаотично, но только в поле плазмы. Вся же система упорядочена движением газа из сопла под достаточно высоким давлением. В экспериментах на плазмотрон приходилось давление газа порядка  $150 \text{ кгс/см}^2$  при  $20^\circ\text{C}$ .

На рис. 2 представлены схемы движения частиц  $\text{Ш} + \text{C}$  в потоке плазмы [8]. При проведении экспериментов выявлено, что частицы синтезируемого материала вылетают из плазменной дуги раньше, чем достигают ее конца и ни в коем случае не двигаются по прямолинейным траек-

ториям. Данное явление связано с перечисленными выше факторами, а также высокой плотностью плазменного разряда. Это явление было исследовано авторами в работе [9]. В рассматриваемой системе, помимо W и C, присутствуют также Ca, Si, Fe, Mg и т.д. Эти элементы имеют меньшую температуру плавления, чем вольфрам, а также более активны по отношению к углероду. Скорость химической реакции при восстановлении этих элементов протекает значительно быстрее, а значит, в потоке плазмы они достигают точки «выхода» раньше, чем более тугоплавкий вольфрам и его соединения с углеродом.

Результатом движения и выброса частиц из плазмы был мелкодисперсный порошок и смесь газа, а также взвесь, выносимая потоками газа из реактора. На рис. 1 областями A и B схематично отмечено накопление выбрасываемого материала, часть которого накапливалась на стенках камеры реактора в виде наплава.

На рис. 2, в представлено поперечное сечение плазменного разряда, где показана траектория движения частиц и их примерное направление движения. Таким образом, всё движение частиц представлено автоколебаниями или хаотичным аттрактором, ограниченным полем плазмы  $B_0$ , из которого вырываются (выбрасываются) разогретые частицы.

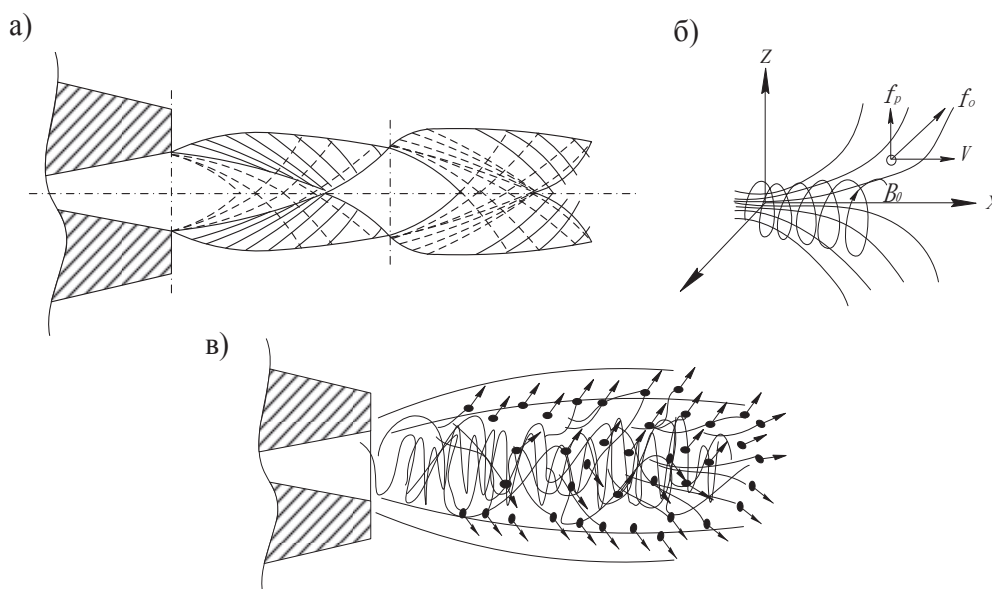


Рис. 2. Схема движения потока газа: а – из сопла плазматрона с расположением поперечных и продольных волн; б – схема траекторий движения частиц Ш + С из плазменного потока, где линия  $B_0$  – линия движения электромагнитного поля плазмы; в – схема поперечного разреза плазменного потока с изображением траекторий движения частиц Ш + С

Если в системе будет присутствовать хаотичный аттрактор, то и гарантированно будет происходить перемешивание компонентов системы наряду с их разделением до однофазной формы.

Показатели двухфазного потока плазмы в значительной степени зависели от подаваемого порошка (шихты), от объёма и размера частиц. Было выявлено, что чем больше по объёму материала подается в плазменную горелку, тем выше показатели плазмы по температуре и плотности, а при изменении среднего размера частиц с 1000 мкм до 50 – 150 мкм процесс синтеза в реакторе протекал более стабильно.

Фазовый анализ продуктов синтеза проводили на сканирующем электронном микроскопе VEGA3LMH (TESCAN), оснащённом энергодисперсионным спектрометром X-Max80 (Oxford Instruments). Фотографирование образцов и поиск микровключений производились преимущественно в режиме обратно рассеянных электронов (BSE-детектор). С его помощью фазы с более

высоким средним атомным числом при получении изображения отражаются в контрасте более ярко по сравнению с фазами, имеющими меньшее среднее атомное число.

Синтезированный карбид вольфрама исследовался с помощью просвечивающего электронного микроскопа ZEISS Libra-120, оснащенного HAADF-детектором и энергетическим  $\Omega$ -фильтром. Исследования проводились в режимах на просвет, темного поля и электронной микродифракции. Образцы для просвечивающей микроскопии подготавливались методом электролитической полировки и ионным травлением.

Состав шлака и синтезированного продукта изучался с помощью дифрактометра Дрон7 с трубкой из СО на  $K_{\alpha}$ -линии рентгеновского излучения со скоростью съёмки два градуса в минуту.

Взятый для экспериментов шеелитовый концентрат ( $\text{CaWO}_4$ ) содержал порядка 35 – 55 % вольфрама, химический состав которого приведен в табл. 1. В качестве восстановителя и карбидизатора был взят углерод С в виде графита.

Состав шихты был подобран методом ранжирования и оптимизации на основе типа восстановителя. Общее количество углерода составило порядка 30 %, а шеелита – 70 %. Необходимое количество углерода в шихте подобранно с 10-процентным избытком для восстановления и вывода из общей системы помимо W попутных химических элементов.

Смесь из шеелита и графита загружали в шаровую мельницу и перемешивали в течение 1 ч. Полученный помол с размером частиц порядка 100 мкм и усредненного по химическому составу загружали в баллон б (см. рис. 3).

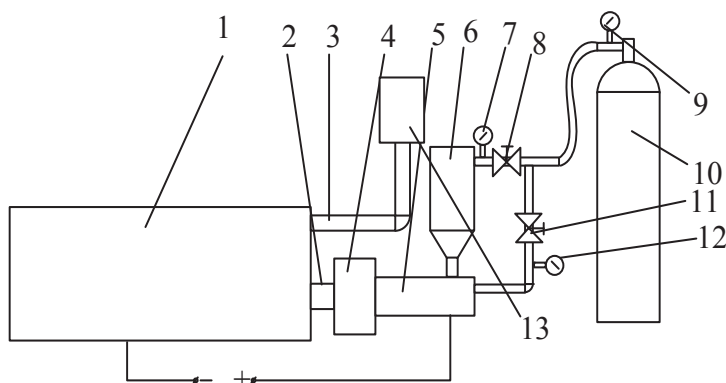


Рис. 3. Схема лабораторной установки по синтезу карбида вольфрама:

- 1 – камера синтеза; 2 – плазмотрон; 3 – патрубок отвода газа и взвеси;  
4 – радиатор охлаждения; 5 – устройство подачи шихты; 6 – баллон с шихтой;  
7, 9, 12 – манометры; 8, 11 – вентили подачи газа; 10 – баллон с газом; 13 – фильтр

Под давлением газа (в экспериментах использовался аргон по ГОСТ 10157-79) порядка  $150 \text{ кгс/см}^2$  подавали в устройство подачи смеси 5 из баллона 6. Далее, смесь газа и порошка попадала в плазмотрон 2, создавая плазменную дугу. Продукты плазмохимического синтеза попадали в камеру 1, где часть возгоняемого материала вместе с газом выводилась из камеры 1 по патрубку 3, а взвесь оседала на стенках фильтра 13.

#### Результаты и обсуждение

Температура плазмы в камере синтеза составила порядка 6000 – 8000 К, а средняя температура продуктов синтеза в камере – 2800 – 2950 К. Процесс синтеза 100 г шихты протекал в течение 120 с, при этом порядка 26 – 28 масс.% шихты возгонялось и выводилось вместе с газами из реактора синтеза.

Полученный материал на 84 % состоял из соединений  $\text{W}_n\text{C}$  и W. Шлак составил порядка 16 масс.% и был представлен соединениями  $\text{Fe}_n\text{C}$ ,  $\text{CaCO}_3$ , CaC, а также 0,8 – 1,0 масс.% составили примеси различных соединений Mg и Mn. Из синтезированного порошка WC постоянным магнит-

ным полем были удалены соединения  $Fe_nC$ . Также методом выщелачивания были удалены и другие примеси Ca, Mg, Mn и т.д.

Был проведен химический анализ возгоняемых материалов, задержанных фильтром 13 (см. рис. 3). Выявлено наличие таких химических элементов, как Si, Fe, Ca, Mg, Mn, а также соединения W в объеме 13,61 масс.%, данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание химических элементов в шлаке, отобранного со стенок фильтра

Химический элемент	C	W	Si	Fe	Ca	Mg	P	Mn	Cu	Прочие
(вес.%)	14,81	13,61	11,58	18,54	29,62	4,5	4,24	0,2	0,9	2

Проведен фазовый анализ и определен химический состав синтезированного материала, отобранного со стенок камеры реактора и полученного в результате выброса из плазменной дуги шлака (см. рис. 4). Химический состав материала, отобранного только со стенок реактора, приведен в табл. 3. Выявлено, что среднее содержание углерода в образце (см. рис. 4, а) составляет порядка 6,43 масс.%, остальное – фаза WC.

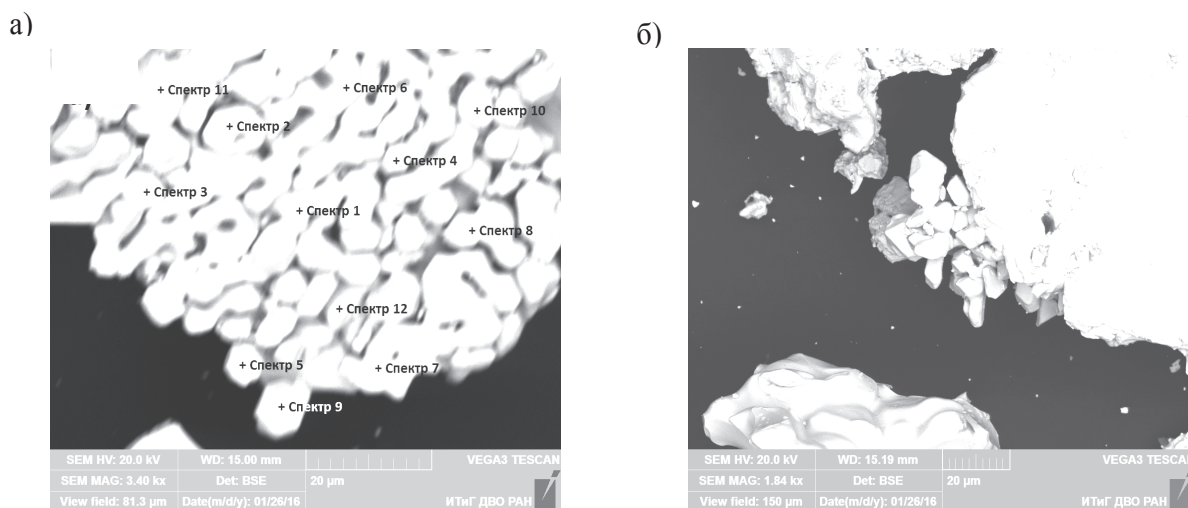


Рис. 4. Изображение синтезированного W –  $W_2C$ : а – WC со стенок реактора; б – образец вольфрама с кристаллами WC –  $W_2C$

Таблица 3

Содержание химических элементов в образце со стенки реактора, положение (см. рис. 4, а)

Номер спектра		Сп1	Сп2	Сп3	Сп4	Сп5	Сп6
Химический элемент (вес.%)	C	6,16	5,79	3,77	4,67	4,89	5,6
	W	93,85	94,21	96,23	95,33	95,11	94,4

Продолжение табл. 3

Номер спектра		Сп7	Сп8	Сп9	Сп10	Сп11	Сп12
Химический элемент (вес.%)	C	6,05	6,01	13,89	6,7	9,75	3,94
	W	87,96	93,99	86,1	93,3	90,25	96,06

На рис. 4, б показаны кристаллы  $W_2C$ , полученные в результате воздействия плазмой и выделенные из зоны реактора А (см. рис. 1). Подобное образование кристаллов могло возникнуть благодаря выбросу частиц  $W_nC$  из плазменного потока и дальнейшего их плавления в камере реактора. Вследствие постоянного нагрева кристаллы могли сплавляться друг с другом, что привело к образованию крупных частиц. Размер образцов вольфрама на рис. 4, б составляет 110 – 150 мкм, размер кристаллов карбида вольфрама – порядка 5 – 10 мкм.

Полученные продукты синтеза исследовались на просвечивающем электронном микроскопе для определения кристаллической решётки полученного карбида вольфрама. Результаты исследований представлены на рис. 5, б, в.

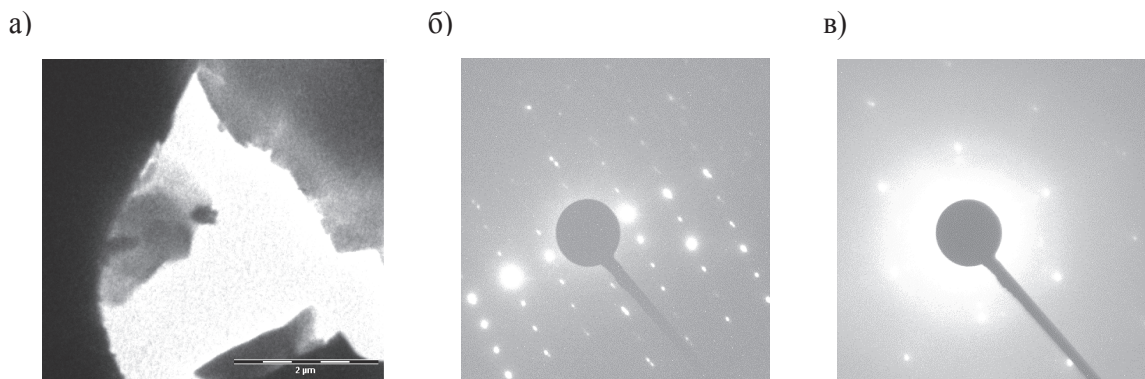


Рис. 5. СЭМ-изображение карбида вольфрама  $WC - W_2C$ : а – масштаб частиц (2 мкм); б, в – электронная дифрактограмма кристаллической решётки скола

По результатам исследований можно сделать вывод, что образцы полученного карбида вольфрама имеют две кристаллографические модификации:

1)  $\alpha$ -WC с гексагональной решеткой, имеющей периоды  $a = 0,2906$  нм,  $c = 0,2839$  нм, пространственная группа  $P6m2$ .

2)  $\beta$ -WC с кубической гранецентрированной решеткой (с периодом  $a = 0,4220$  нм), пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ , которая устойчива свыше  $2525$  °C [13], а также карбид дивольфрама  $W_2C$ , кристаллы которого образуют гексагональную сингонию с параметрами ячейки  $a = 0,29948$  нм,  $c = 0,47262$  нм,  $Z = 1$ . Выше  $1427$  °C переходит в фазу кубической сингонии, пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ , параметры ячейки  $a = 0,4220$  нм,  $Z = 4$  [11; 12].

Был исследован химический состав образцов  $W - W_nC$ , отобранных из шлака, скопившегося в камере синтеза (см. рис. 6).

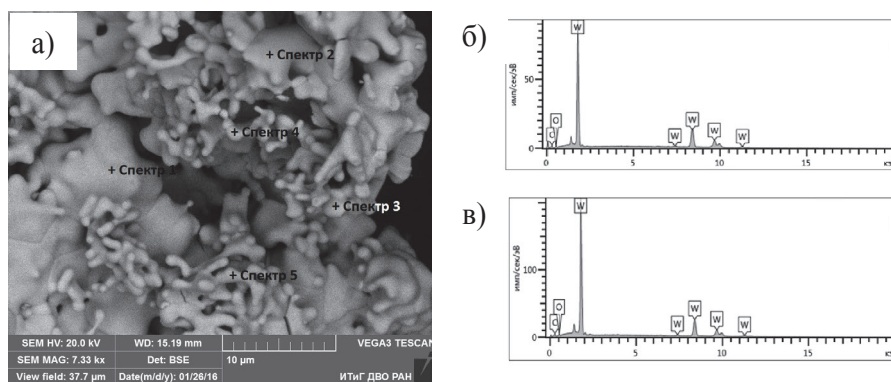


Рис. 6. Изображение образцов карбида вольфрама  $W - W_nC$ : а – отобранных из шлака камеры синтеза; б – спектрограмма образцов  $W - W_nC$  (см. рис. 6, а); в – спектрограмма образцов (см. рис. 4, а) в сравнении

Химический состав материала, выбранного только из шлака реактора, приведен в табл. 4. Выявлено, что среднее содержание углерода в образце (см. рис. 6, а) составляет порядка 6,09 масс. %.

Таблица 4

Содержание химических элементов в образце из шлака реактора, положение (см. рис. 6, а)

Номер спектра		Сп1	Сп2	Сп3	Сп4	Сп5
Химический элемент (вес.%)	C	5,6	6,05	6,01	13,89	6,7
	W	94,4	93,96	93,99	86,1	93,3

Состав и структура полученного карбида вольфрама как на стенках реактора, так и в шлаке не отличается. Фазовый анализ показал, что в образцах, выделенных из шлака, присутствуют преимущественно фазы WC порядка 87,6 масс. %, W порядка 7,35 масс. %,  $W_2C + W_nC$  порядка 5,65 масс. %.

Над полученными образцами после отделения от шлака были проведены следующие операции: перемол в шаровой мельнице до размеров частиц порядка 1 – 5 нм и выщелачивание.

После определения среднего содержания углерода в полученном полуфабрикате предпринималась попытка доведения содержания C до стехиометрического состава. Так, объём углерода в продукте составил порядка 6,2 масс. %. На рис. 7 представлено изображение конечного продукта WC чистотой порядка 98,9 масс. % с общим содержанием примесей порядка 0,09 масс. % и свободного C порядка 1 масс. %.

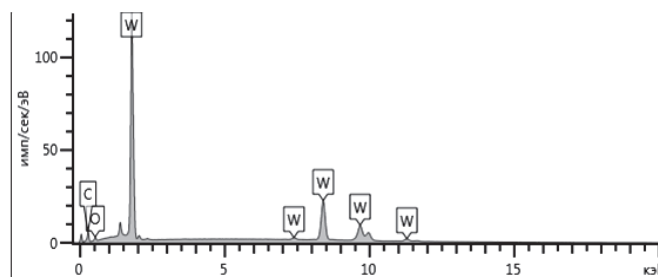
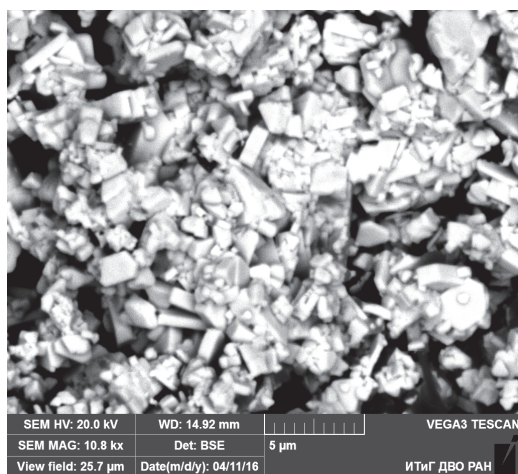


Рис. 7. Изображение конечного продукта WC 98,9 масс. % слева, справа рентгенограмма полученного карбида вольфрама

### Заключение

Установлено, что происходит восстановление вольфрама в виде карбида WC,  $W_2C + W_nC$ , а также W из многокомпонентного вольфрамсодержащего минерального сырья энергиями высокой плотности порядка  $g > 10^4 - 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Технология получения WC с использованием плазмохимического синтеза позволяет получать чистоту конечного продукта в пределах 98 – 99 масс. %.

Использование плазмохимического синтеза позволяет получить моновольфрам и карбиды вольфрама  $W_nC$  как полуфабрикат высокой частоты с размером частиц порядка 1 – 5 нм в один технологический приём.

Показана перспективность использования энергии высокой плотности для синтеза тугоплавких соединений из вольфрамсодержащего минерального сырья.

Выявлено, что высокотемпературная среда плазмы позволяет разрушать кристаллическую решетку минерала и разделять все химические элементы, а также W и в значительной степени возгонять их. Выброс менее тугоплавких соединений в отличие от  $W_nC_n$  происходит намного раньше. Это было прослежено в виде отложений на стенках камеры синтеза.

Усовершенствование конструкции реактора позволяет сепарировать попутные химические элементы в зависимости от их температуры плавления и кипения, что увеличивает чистоту получаемого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Туманов, Ю. Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю. Н. Туманов. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2010. – 968 с.
2. Исследование магнетизации железосодержащих руд в СВЧ поле / И. А. Закс, В. Г. Колесник, С. Г. Меламуд [и др.] // Черные металлы. – 2001. – № 11-12. – С. 25-28.
3. Исследование влияния электромагнитного поля сверхвысокочастотного диапазона на молибденовый концентрат / В. Г. Колесник, Н. Н. Мухтарова, Е. В. Урусова [и др.] // Цветные металлы. – 2001. – № 12. – С. 99-102.
4. Исследование возможности применения СВЧ поля для процессов рудоподготовки при получении золота / А. Б. Хван, В. Г. Колесник, Г. С. Саттаров [и др.] // Горный вестник Узбекистана. – 2002. – № 2(9). – С. 56-60.
5. Исследование возможности применения СВЧ поля для процесса измельчения сульфидных руд в производстве золота / Б. С. Юлдашев, Е. В. Урусова [и др.] // Цветные металлы. – 2003. – № 2. – С. 16-18.
6. Deliang Chen, Hejing Wen, Haitao Zhai, Hailong Wang, Xinjian Li, Rui Zhang, Jing Sun and Lian Gao. Novel synthesis of hierarchical tungsten carbide micro-nanocrystals from a single-source precursor. J. Am. Ceram. Soc, 2010. – 93(12). – pp. 3997-4000.
7. Дейч, М. Е. Техническая газодинамика / М. Е. Дейч. – 2-е изд., перераб. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 664 с.
8. Князев, Б. А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд: учеб. пособие / Б. А. Князев. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2003. – 290 с.
9. Zawrah, M. F. Synthesis and characterization of WC-Co nanocomposites by novel chemical method / M. F. Zawrah. – J. Ceramics International, 2007, 33. – pp. 155-161.
10. Reddy, K. M. Stability of nanostructured W-C phases during carburization of  $WO_3$  / K. M. Reddy, T. N. Rao, J. Joardar. – J. Materials chemistry and physics, 2011, 128. – pp. 121-126.
11. Onishchenko, D. V. Effect of polymethyl methacrylate on the grinding of a metal-polymer system / D. V. Onishchenko, V. P. Reva, D. V. Moiseenko // Inorganic Materials. – 2012. – Т. 48 (№ 11). – С. 1096-1101.



Предеин В. В., Попов А. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г., Евстигнеев А. И.  
V. V. Predein, A. V. Popov, O. N. Komarov, S. G. Zhilin, A. I. Evstigneev

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ  
ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ВОССТАНОВИТЕЛЯ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОРТОВЫХ МАРОК СТАЛЕЙ ПРИ АЛЮМОТЕРМИИ**

**USE OF ALUMINUM ALLOY WITH HIGH CONTENT OF IMPURITY ELEMENTS  
AS A RESTORER FOR RECEIVING VARIABLES OF STEEL IN ALUMINOTHERMIC  
PROCESS**

**Предеин Валерий Викторович** – младший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: predein3@mail.ru.

**Mr. Valery V. Predein** – Junior researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: predein3@mail.ru.

**Попов Артем Владимирович** – аспирант федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: popov.av@imim.ru.

**Mr. Artyom V. Popov** – a post-graduate student, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: popov.av@imim.ru.

**Комаров Олег Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Mr. Oleg N. Komarov**, PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

**Жилин Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergey-zhilin1@rambler.ru.

**Mr. Sergey G. Zhilin** – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergey-zhilin1@rambler.ru.

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mail@imim.ru.

**Mr. Aleksey I. Evstigneev** – Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur), E-mail: mail@imim.ru.

**Аннотация.** В работе рассматривается возможность использования крупки алюминиевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности, и крупки металлургической окалины для составления термитных композиций. Применяемые алюминиевые сплавы содержат в своем составе значительное количество примесных элементов, влияние которых прослеживается на энергетических параметрах экзотермических реакций и на химическом составе получаемых экспериментальных сплавов. Определены соотношения окалины и восстановителя, при которых наблюдается максимальный выход термитного металла при минимальном остаточном содержании алюминия в получаемой металлической фазе. Установлены марки сталей, которым, согласно действующим стандартам, по химическому составу могут соответствовать получаемые экс-

Предени В. В., Попов А. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г., Евстигнеев А. И.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В КАЧЕСТВЕ ВОССТАНОВИТЕЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОРТОВЫХ МАРОК СТАЛЕЙ ПРИ АЛЮМОТЕРМИИ

периментальные сплавы при введении в состав определенных корректирующих добавок, а также подобраны композиции для получения сплава 20ДХЛ по ГОСТ 977-88.

**Summary.** The paper considers the possibility of using grits of aluminum alloys in the aviation industry and grits of metallurgical scale for composing thermite compositions. The applied aluminum alloys contain a significant number of impurity elements whose effect can be traced on the energy parameters of the exothermic reactions and on the chemical composition of the experimental alloys obtained. Scaling and reducing agent ratios are determined at which the maximum yield of the thermite metal is observed with the minimum residual aluminum content in the resulting metal phase. The steel grades to which the experimental alloys obtained according to the chemical composition can be corresponded according to the effective GOST when certain corrective additives are included in the composition, and also the compositions for obtaining the alloy 20 DXL according to GOST 977-88 are found.

**Ключевые слова:** термитная смесь, химический состав, выход металлической фазы, экзотермическая реакция, железоуглеродистые сплавы, примесные элементы, огнеупорная оснастка.

**Key words:** thermite mixture, chemical composition, metal phase yield, exothermic reaction, iron-carbon alloys, impurity elements, refractory equipment.

УДК 621.74.04

Важной задачей литейного производства является получение литых заготовок с требуемыми свойствами при обеспечении минимальной себестоимости. Решение этой задачи достигается применением специальных способов литья, модернизацией и синтезом существующих методов, контролем процесса на всех стадиях получения отливок, исключением и объединением отдельных операций технологического цикла, использованием доступных, недорогих, местных шихтовых материалов [1]. Термитные технологии получения литых заготовок наиболее предпочтительны для решения этой проблемы. В качестве шихтовых материалов в основном для алюмотермитного переплава используют отходы машиностроительного и металлургического производств, в частности стружку алюминиевых сплавов и окалину [2, 3, 4, 5]. Стружка алюминиевых сплавов является отходом механообрабатывающих цехов предприятий, а окалина, представляющая собой комплекс оксидов железа, является отходом прокатных, кузнечных отделений и отделений непрерывного литья заготовок. Результатом экзотермических процессов в термитных смесях является образование около 50 % металлической фазы, по химическому составу соответствующей железоуглеродистым сплавам, и около 50 % шлаковой фазы, в основе которой содержание оксида алюминия достигает 80 %. Получаемая металлическая фаза, в частности ее химический состав, формирующийся в зависимости от условий прохождения реакции, является объектом исследований.

Помимо этого термитные технологии обладают рядом несомненных преимуществ в сравнении с традиционными методами литья: исключение из технологического цикла печей для получения расплава, в результате чего энергозатраты сокращаются по сравнению с традиционным переплавом (в последнем случае доля расходов, связанных с энергозатратами, достигает 50 % от конечной стоимости продукции); получение изделий целиком из металла, образующегося в ходе экзотермической реакции; снижение использования традиционных шихтовых материалов; возможность получения металлопродукции вне специализированных подразделений; переработка металлоотходов машиностроительных предприятий; сокращение площадей, используемых для складирования отходов производства; сокращение времени получения металлоизделий. Все указанные особенности получения литья алюмотермитным переплавом позволяют минимизировать себестоимость литья при соблюдении его качества.

Получение отливок с применением термитных технологий с требуемыми свойствами (в частности, химическим составом) в большей степени зависит от свойств исходных компонентов термитных композиций, их соотношения, температурных параметров шихты и формы, а также материалов применяемой огнеупорной оснастки. Химический состав применяемых исходных материалов, особенно восстановителя, для составления термитных композиций имеет сложный набор

примесных элементов, что затрудняет прогнозирование химического состава получаемых продуктов реакции вследствие их взаимного влияния друг на друга и на энергетические параметры экзотермической реакции. Примесные элементы или их соединения в процессе основной реакции способны диссоциировать, образовывать новые соединения, способствующие переходу элементов из металлической в шлаковую и газовую фазы и наоборот [6, 7]. Наличие большого количества примесных элементов в используемых материалах и применяемые для корректировки химического состава экспериментальных сплавов инертные наполнители способны критически снизить температуру продуктов реакции ниже 2050 °С. Это значение соответствует температуре плавления оксида алюминия, основного составляющего алюмотермитного шлака. Снижение этой температуры ниже 2050 °С недопустимо в силу того, что для эффективного разделения металла и шлака необходимо жидкое состояние всех продуктов реакции [8, 9]. В противном случае металлическая фаза будет иметь шлаковые включения, что отражается на свойствах получаемых литых заготовок. Согласно [10] допускается применение алюминиевых сплавов для алюмотермии с содержанием примесных элементов до 13 %.

Таким образом, целью настоящей работы стало исследование возможности получения литых заготовок из сортовых марок сплавов с применением в качестве восстановителя авиационных алюминиевых сплавов с высоким содержанием примесных элементов.

Экзотермические реакции проводили в огнеупорных тиглях, выполненных из боя графитированных электродов марки ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003, применяемых для плавки стали в электродуговых печах. Плотность огнеупорного материала – 1700 кг/м<sup>3</sup>. Объем рабочего пространства тигля – 0,000572 м<sup>3</sup>, толщина стенки – 0,01 м. Масса тигля составляла 0,71 кг. Объем рабочего пространства соответствовал объему засыпки смеси с минимальной насыпной плотностью массой 1 кг для получения требуемых размеров образца. Тигель после засыпки смеси накрывали крышкой с отверстием для выхода газов диаметром 20 мм. Внутренний диаметр тигля равен высоте его рабочего пространства и составляет 0,09 м. В дне тигля устанавливалась специальная разовая вставка с отверстием 0,007 м для стабилизации скорости разлива расплава. Смесь перед инициацией реакции не подвергалась дополнительному уплотнению. Отверстие для слива металла закрыто диском-стопором диаметром 0,05 м и толщиной 0,005 м, выполненным из графита указанной марки.

После прохождения реакции и выдержки расплава в тигле в течение 10 с (для обеспечения разделения металла и шлака) стопор выбивается и форма заполняется металлом. Форма представляет собой цилиндр с глухим дном, выполненный из графита марки ЭГ15 с внутренним диаметром 0,03 м, толщиной стенки 0,03 м, высотой 0,15 м.

Перед проведением экспериментов огнеупорная оснастка нагревается до 150 °С и покрывается противопопригарной краской следующего состава: маршалит – 20 %, жидкое стекло – 5 %, вода – 74 %, борная кислота – 1 % [5].

В качестве восстановителя использована смесь алюминиевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности, в виде крупки фракции 0,2 – 1,5 мм, следующего химического состава: Al = 89,443 %; Mn = 0,304 %; Si = 1,097 %; Cr = 0,062 %; Ni = 0,008 %; Cu = 2,040 %; Fe = 0,166 %; Mg = 3,917 %; Zn = 2,961 %. Окалина применялась также в виде крупки фракции 0,2 – 1,5 мм и имела следующий химический состав: C = 0,150 %; Mn = 1,188 %; Si = 2,960 %; S = 0,030 %; P = 0,030 %; Fe = 71,500 %; Al = 0,697 %; Ni = 0,188 %; Cr = 0,173 %; Cu = 0,444 %; O<sub>2</sub> = 22,639 %.

Подготовка термитных смесей осуществлялась перемешиванием в смесителе в течение 10 мин; сушкой при температуре 150 °С в течение 1 ч, повторном перемешивании в течение 10 мин, при котором происходит гомогенизация композиции и незначительное дробление компонентов, а также очистка поверхности частиц восстановителя от оксидной пленки. Этот процесс увеличивает взаимодействие между реагирующими материалами.

С технологической точки зрения первостепенной задачей является получение максимального количества металла с единицы массы смеси при условии соблюдения его химического состава. На рис. 1 представлен график изменения выхода металлической фазы в зависимости от соотношения окалины и алюминиевого сплава в термитной композиции.

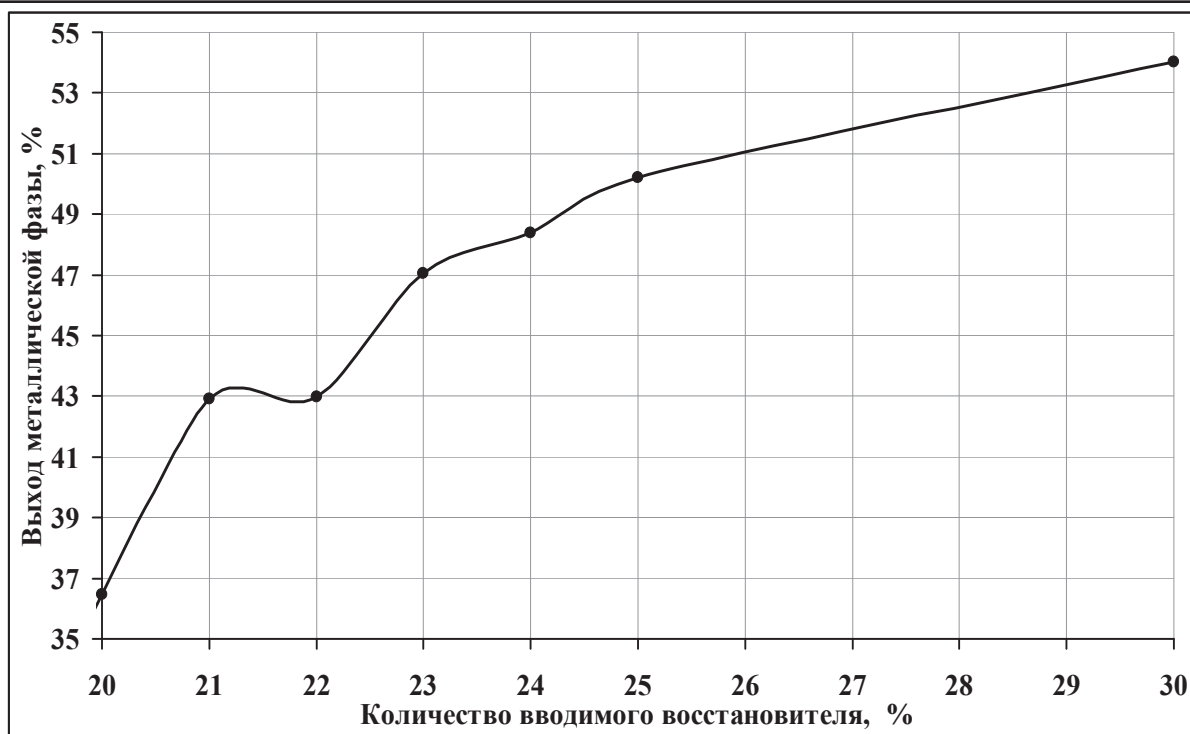


Рис. 1. Выход образующейся металлической фазы в зависимости от содержания восстановителя в термитных композициях

Из зависимости следует, что увеличение в составе термитных композиций восстановителя в диапазоне 20 – 30 % по массе происходит из-за увеличения массы вышедшего металла. Минимальный выход 36,5 % металла наблюдается при использовании соотношения восстановителя и окалины 20/80, а максимальный выход 54 % соответствует соотношению исходных компонентов в смеси 30/70. Максимальный прирост 17,5 % по массе наблюдается при изменении содержания восстановителя с 20 до 21 %. На участке 21 – 22 % содержания восстановителя выход металлической фазы фактически фиксируется на отметке в 43 %. При дальнейшем изменении соотношения с 22 до 25 % этот показатель в среднем увеличивается на 16,7 %, а при изменении содержания алюминия с 25 до 30 % выход металлической фазы повышается на 7,6 %. Последующее увеличение содержания алюминия в составе смесей на изменение выхода термитного металла влияет незначительно, но может являться причиной появления высокого содержания остаточного алюминия.

Установлено, что в интервале значений 20 – 25 % содержания восстановителя в термитной композиции происходят наиболее существенные изменения химического состава экспериментальных сплавов. Исходя из этого, указанный диапазон содержания восстановителя был исследован с шагом 1 %. В данном диапазоне происходит интенсивное изменение усвоения большинства примесных элементов (кремния, марганца, хрома, углерода), в том числе интенсивный рост остаточного содержания алюминия. В табл. 1 представлен химический состав экспериментальных сплавов в зависимости от соотношения восстановителя и окалины в термитных композициях.

Остаточное содержание алюминия в получаемой металлической фазе существенно влияет на ее свойства. Следовательно, необходимо стремиться к минимальному его содержанию в экспериментальных сплавах. Установлено, что чем выше содержание алюминия в термитных композициях, тем выше его остаточное содержание в экспериментальных сплавах. Минимум содержания алюминия в термитных сплавах наблюдается при использовании композиции с 20 до 23 % алюминиевого сплава и находится в диапазоне 0,012 – 0,019 %. Увеличение содержания восстановителя до 25 % приводит к повышению содержания остаточного алюминия в металле до 2,9 %. При дальнейшем повышении содержания восстановителя в смеси до 30 % происходит увеличение остаточ-

ного содержания алюминия в металле, максимальное значение которого составляет 7,1 %. Низкое содержание остаточного алюминия в термитном расплаве, при его содержании в термитной смеси до 22 %, объясняется тем, что он целиком расходуется на восстановление железа из окислов. Более высокое содержание восстановителя в композициях приводит к насыщению им термитного металла.

Таблица 1

Химический состав сплавов, полученных из термитных смесей с использованием различного содержания восстановителя

Элемент	Количество вводимого в шихту восстановителя, %						
	20	21	22	23	24	25	30
Углерод	0,030	0,060	0,070	0,250	0,360	0,430	0,450
Марганец	0,030	0,030	0,060	0,190	0,370	0,920	1,240
Кремний	0,030	0,040	0,070	0,150	0,390	0,590	0,790
Сера	0,060	0,027	0,035	0,028	0,023	0,028	0,040
Фосфор	0,030	0,018	0,012	0,018	0,018	0,019	0,030
Хром	0,020	0,020	0,030	0,040	0,060	0,070	0,090
Никель	0,120	0,120	0,080	0,120	0,110	0,110	0,100
Медь	1,430	1,290	1,070	1,270	1,310	1,360	1,550
Алюминий	0,012	0,016	0,019	0,310	0,930	2,900	7,070
Железо	98,238	98,379	98,554	97,624	96,429	93,573	88,640

Высокое содержание примесных элементов в исходных компонентах термитных смесей снижает энергетический потенциал экзотермической реакции и способствует уменьшению взаимодействия углеродной оснастки и металлической фазы. Согласно зависимости, представленной на рис. 1, максимум насыщения углеродом экспериментальных сплавов происходит при использовании в составе смесей 30 % восстановителя. Значение предельного содержания углерода при этом составляет 0,45 %. Скорость растворения углерода определяется температурой продуктов реакции и скоростью ее протекания. Минимальное значение содержания углерода в экспериментальных составляет 0,03 – 0,07 % при диапазоне значений содержания восстановителя в термитных смесях 20 – 22 %.

Насыщение сплава углеродом происходит при взаимодействии продуктов реакции с углеродной оснасткой, что подтверждается интенсивным износом тиглей выполненных из электродного графита. Исследованиями установлено, что износ графитовых тиглей при экстремальных условиях эксплуатации за одну плавку достигает 5 % от его первоначальной массы. Следовательно, при проведении экзотермических реакций с использованием углеродных тиглей и форм необходимы термитные шихты с меньшей теплотворной способностью, обеспечивающие создание предельно низких температур продуктов реакций.

Прогнозирование содержания углерода в экспериментальных сплавах, помимо учета влияния температурных параметров продуктов реакций, осложняется наличием других примесных элементов, определяющих его усвоение (например: марганец и хром повышают его содержание, а кремний и фосфор понижают). Содержание углерода в экспериментальных сплавах при использовании углеродной оснастки и смесей без инертных наполнителей превышает его содержание в исходных компонентах термитных смесей в десятки раз.

Содержание углерода в сплавах, получаемых алюмотермией, предпочтительней определять не расчетами, а экспериментально, проводя экзотермические реакции опытных партий термитных композиций.

Более предсказуемо поведение таких примесных элементов, как хром, марганец, кремний, медь, никель и т.д. Содержание марганца, как и кремния, в получаемых экспериментальных сплавах определяется не только его содержанием в исходных компонентах, но и зависит от температурных параметров реакций, определяемых содержанием в смеси восстановителя, влияющего на окисленность расплава и полноту процесса восстановления железа, примесных элементов и насыщение ими металлической фазы. Экспериментально установлено, что усвоение марганца из исходных компонентов термитных композиций составляет 1,4 – 91 % в интервале 20 – 30 % содержания в шихтах восстановителя. Более полное усвоение марганца металлической фазой наблюдается при еще большем содержании восстановителя в смесях. Таким образом, содержание марганца в экспериментальных сплавах составляет 0,03 – 1,24 % при использовании восстановителя в термитных композициях в интервале значений 20 – 30 %. Наиболее значительный прирост содержания марганца в сплавах наблюдается в интервале 24 – 25 % содержания восстановителя в шихте, при этом количество Mn возрастает с 0,37 до 0,92 %. При содержании в смесях 25 – 30 % восстановителя содержание марганца в сплавах увеличивается с 0,92 до 1,24%.

Согласно проведенным исследованиям незначительный рост кремния с 0,03 до 0,07 % наблюдается при содержании восстановителя 20 – 22 %. При этом усвоение кремния составляет 0,5 – 1,5 %. В диапазоне содержания восстановителя в термитных композициях 22 – 30 % усвоение кремния растет с 3,5 до 20,1 %. Максимальное усвоение кремния при высоких содержаниях восстановителей в термитных смесях объясняется высоким остаточным содержанием алюминия в сплавах. Такое содержание позволяет дополнительно восстанавливать кремний из исходных компонентов термитных шихт. Использование менее 21 % восстановителя в составе смесей приводит к снижению усвоения кремния сплавом. Это объясняется тем, что данное соотношение не является достаточным для полного восстановления всех оксидов, т.к. в первую очередь восстанавливаются оксиды железа.

В экзотермических процессах изменение содержания хрома в итоговом металле от содержания восстановителя в термитных смесях незначительно отличается от закономерности содержания марганца и кремния. Начало роста содержания хрома в сплаве замечено с 21 % содержания восстановителя. В целом количество хрома растет во всем исследуемом диапазоне. При этом усвоение хрома достигает 43,2 %, а в сплаве его содержится до 0,09 %.

При использовании применяемого восстановителя, содержащего 2,1 % меди, ее количество в сплаве имеет обратный пик в области 22 %. Это объясняется тем, что в экзотермическом процессе при недостатке восстановителя в первую очередь восстанавливается медь, никель, а затем железо. Следовательно, при увеличении количества восстановителя в термитных смесях появляется большее количество восстановленного железа, разбавляющее содержание меди. Это происходит до достижения максимума восстановления железа из его оксидов. После этого сплав начинает насыщаться медью, содержащейся в восстановителе. Минимум содержания меди в сплаве при этом составляет 1,07 %, а усвоение составляет 64,3 %. Максимум содержания меди в сплаве при использовании данного восстановителя составляет 1,55 %, при этом усвоение находится в пределах 98,7 %.

Динамика изменения содержания меди в сплаве характерна для никеля с пиками в тех же точках, но со своими численными значениями. Использование данного восстановителя обеспечивает глубокий пик при 22 % его содержания в шихте. При этом содержание никеля составляет 0,08 %, а его усвоение – 29,5 %. Усвоение никеля во всем исследуемом диапазоне составляет 29,5 – 51,4 %, при этом его содержание в сплавах 0,08 – 0,12 %.

Содержание серы в экспериментальных сплавах находится в пределах 0,023 – 0,06 %. Усвоение серы сплавами составляет 50,1 – 97,5 %. Сера в сплавах является вредной примесью, определяющей необходимость выбора режимов проведения экзотермических реакций с учетом факторов, обеспечивающих допустимое содержанием данного элемента.

Фосфор в исследуемых сплавах при использовании рассматриваемого восстановителя находится в пределах 0,012 – 0,03 %. При этом усвоение фосфора получаемыми сплавами составляет 25,3 – 84,1 %.

Применяемый в качестве восстановителя алюминиевый сплав содержит более 2 % меди, что влияет на наличие этого элемента в экспериментальных сплавах. В них содержание меди составляет не менее 1 %. Это вынуждает использовать данные расплавы в качестве основы для получения литейных сплавов по химическому составу соответствующих стандартам с высоким содержанием меди, например: 12ДН2ФЛ, 10Х14НДЛ, 20ДХЛ и т.д.

Во всем диапазоне содержания применяемого восстановителя количество углерода в сплавах не превышает значений, характерных для эвтектоидного превращения. Для получения большинства сплавов согласно стандарту требуется подшихтовка по кремнию, марганцу и хрому. Сера, фосфор и никель в основном попадают в границы их содержания для большинства литейных сплавов. Пределом содержания рассматриваемого восстановителя в шихтовых материалах можно считать 23 %. При этом количество остаточного алюминия в сплаве составляет 0,31 %, а выход термитного металла достигает 47,1 %. Термитные смеси с таким соотношением окислы и восстановителя можно назвать базовым составом. Он будет использоваться в дальнейшем в качестве экспериментальной основы для составления композиций, предназначенных для получения сплавов, соответствующих по химическому составу стали 20ДХЛ по ГОСТ 977-88. Для регулирования химического состава получаемых сплавов использовались следующие компоненты:

- порошок ферромарганца ФМн-78(А) фракции до 0,063 – 0,4 мм, отвечающий требованиям ГОСТ 4755-91 «Ферромарганец. Технические требования и условия поставки», с химическим составом: Mn = 78,050 %; C = 6,990 %; Si = 0,790 %; S = 0,008 %; P = 0,500 %;

- порошок феррохрома ФХ025А фракции 0,063 – 1 мм, отвечающий требованиям ГОСТ 4757-91 «Феррохром. Технические требования и условия поставки», с химическим составом: Cr = 79,500 %; C = 0,110 %; Si = 1,830 %; S = 0,028 %; P = 0,030 %;

- крупка медного сплава марки М1 по ГОСТ 859-2001 фракции 1 – 3 мм с химическим составом: Cu = 99,8 % (остальное примеси);

- порошок графитированных электродов ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003 фракции до 0,063 мм с химическим составом: C = 99,8 % (остальное примеси).

В табл. 2 представлены исходные материалы для составления шихтовых композиций, сформированные на основе базового состава, и результаты исследования корректировки их содержания в смесях, отражающиеся на химическом составе получаемых экспериментальных сплавов. Согласно табл. 2 химическому составу стали 20ДХЛ соответствует сплав, получаемый из шихтового состава № 8. В ходе эксперимента установлено, что даже при незначительных изменениях соотношения компонентов термитных смесей получаются сплавы со значительными различиями в содержании примесных элементов. В табл. 3 представлены значения усвоения химических элементов сплавами, полученными при корректировке базового состава.

В ходе анализа представленных данных установлено, что усвоение элементов экспериментальными сплавами повышается при увеличении в составе шихтовых композиций соответствующей лигатуры. Зависимость носит нелинейный характер, т.к. введение в состав композиций дополнительных наполнителей оказывает влияние на энергетическую составляющую реакции, что наряду со взаимодействием примесных элементов между собой также оказывает влияние на их распределение между фазами.

В алюмотермии использование в качестве восстановителя алюминиевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности, с большим содержанием примесных элементов и в углеродной оснастке направлено на получение сплава, соответствующего по химическому составу стали 20ДХЛ (ГОСТ977-88). В таких реакциях сложно предсказать значение усвоения химических элементов металлической фазой, их распределение между газовой и шлаковой фазами. Корректировку компонентов в шихте необходимо проводить экспериментально, ориентируясь на химический состав сплава. Применение металлоотходов машиностроительных и металлургических предприятий для формирования отливок, получаемых алюмотермией из железоуглеродистых сплавов, позволит снизить себестоимость литья.

Таблица 2

Шихтовые материалы и их соотношения для корректировки химического состава сплава, получаемого с применением базовой термитной смеси для стали 20ДХЛ по ГОСТ 977-88

Базовый состав	Наполнитель, гр.	Химический состав исходного сплава, %									
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
23 % восстановителя	-	0,250	0,190	0,150	0,028	0,018	0,040	0,120	1,270	0,310	97,624
Корректировка химического состава											
Вид наполнителя	Наполнитель, гр.	Хим. состав сплава после введения наполнителей, %									
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
ФМн78(А)	7	0,190	0,340	0,220	0,021	0,023	0,450	0,110	1,340	0,610	96,666
ФХ025А	8										
М1	1,5										
ФМн78(А)	17	0,160	0,390	0,140	0,022	0,021	1,180	0,110	1,380	0,076	96,521
ФХ025А	18										
М1	1,8										
ФМн78(А)	30	0,350	1,030	0,330	0,025	0,024	1,180	0,110	1,500	0,870	94,581
ФХ025А	16										
М1	2,3										
ЭГ15	0,2										
ФМн78(А)	25	0,280	0,960	0,400	0,021	0,026	1,220	0,110	1,490	0,660	94,833
ФХ025А	15										
М1	2,3										
ФМн78(А)	23	0,650	0,950	0,340	0,026	0,028	1,200	0,110	1,490	0,760	94,446
ФХ025А	14										
М1	2,2										
ФМн78(А)	20	0,630	0,740	0,310	0,018	0,024	1,130	0,110	1,500	0,590	94,948
ФХ025А	12										
М1	2,2										
ФМн78(А)	19	0,840	0,770	0,340	0,025	0,025	1,040	0,110	1,490	0,440	94,920
ФХ025А	11										
М1	2,1										
ФМн78(А)	18	0,170	0,630	0,260	0,020	0,025	0,850	0,110	1,510	0,590	95,835
ФХ025А	10										
М1	2,1										
ФМн78(А)	17	0,170	0,500	0,240	0,019	0,019	0,730	0,110	1,520	0,360	96,332
ФХ025А	9										
М1	2										
Сталь 20ДХЛ по ГОСТ 977-88	-	0,150- 0,250	0,500- 0,800	0,200- 0,400	до 0,040	до 0,040	0,800- 1,100	-	1,400- 1,600	-	остальное

Примечание: ФМн78(А) – Ферромарганец ФМн78(А) по ГОСТ 4755-91; ФХ025А – Феррохром ФХ025А по ГОСТ 4757-91; М1 – Медь М1 по ГОСТ 859-2001; ЭГ15 – Графит электродный ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003

Усвоение химических элементов сплавами в зависимости от содержания легирующих компонентов в термитных смесях

Химический элемент	Усвоение химических элементов, %									
	Базовый	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Углерод	130,8	67,6	38,5	61,7	57,4	137,5	144,3	201,8	42,6	43,0
Марганец	11,5	14,0	9,5	17,8	19,5	20,0	17,0	18,6	15,9	12,8
Кремний	3,5	5,2	3,2	7,7	9,8	8,2	7,5	8,3	6,5	5,8
Сера	58,8	45,3	47,3	55,6	48,3	58,6	40,5	57,2	46,4	43,0
Фосфор	41,9	54,4	48,8	57,4	64,6	68,3	58,5	62,2	63,1	46,9
Хром	16,0	32,3	42,1	49,0	55,3	56,6	60,7	61,3	55,0	50,4
Никель	49,2	45,3	44,0	46,3	47,8	47,0	47,0	48,0	48,8	47,8
Медь	81,9	74,8	75,3	81,1	83,0	82,0	82,0	83,7	85,9	85,2
Алюминий	0,7	1,5	0,2	2,2	1,7	1,9	1,5	1,1	1,5	0,9
Железо	81,4	83,2	83,3	85,2	88,0	85,8	85,8	87,3	89,3	87,6

## ЛИТЕРАТУРА

1. Специальные способы литья: справ. / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович [и др.]; под общ. ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Комаров, О. Н. Использование термитных материалов в технологиях получения стальных отливок: моногр. / И. Г. Сапченко, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 166 с.
3. Применение термитных прибылей при получении стальных отливок / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, В. В. Предеин // Литейное производство. – 2009. – № 6. – С. 33-36.
4. Свойства термитных сталей из отходов металлургического производства / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, Н. Г. Зиновьев // Металлургия машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 26-28.
5. Особенности получения металлошихты из отходов машиностроительных предприятий / О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, И. Г. Сапченко, А. В. Попов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-5. – С. 914-918. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39650> (дата обращения 08.01.2016), свободный.
6. Бигеев, А. М. Металлургия стали / А.М. Бигеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ч.: Металлургия; Челяб. отд-ние, 1988. – 480 с.
7. Борнацкий, И. И. Основы физической химии: учеб. для техникумов / И. И. Борнацкий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 320 с.
8. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Химия, 1991. – 432 с.
9. Новохацкий, В. А. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В. А. Новохацкий, А. А. Жуков, Ю. И. Макарычев. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
10. ГОСТ 295-98. Межгосударственный стандарт. Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюминотермии. Технические условия. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001