

УДК 62-97/98

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. И. Мизин, Т. И. Сокирко

*В статье рассмотрены принципы охлаждения электродвигателей и преимущества электродвигателей с принудительным водяным охлаждением, роль тепловых элементов в электродвигателях с принудительным водяным охлаждением и перспектива создания сварочного оборудования отечественного производства для диффузионной сварки крупногабаритных тепловых элементов.*

*Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме, электрические машины с принудительным водяным охлаждением, сварка тепловых элементов, машина диффузионной сварки в вакууме, машина для сварки тепловых элементов.*

Нагрев любой электрической машины обусловлен преобразованием части электроэнергии в тепловую, трением отдельных конструктивных элементов, величиной нагрузки на валу. Учитывая то, что обмотки большинства промышленных электродвигателей могут работать при температуре, не превышающей 90 – 95 градусов, становится актуальным вопрос выбора эффективных систем охлаждения.

На практике применяют несколько конструктивных решений, способных обеспечить снижение температуры электродвигателя различных типов до нормируемых значений. Наибольшее распространение в промышленных электродвигателях средней и большой мощности получили следующие варианты.

### Принципы самовентиляции электродвигателей

Самый простейший способ – естественное охлаждение двигателя, обеспеченное за счет передачи накопленного тепла в окружающий воздух через корпус электродвигателя. Но такой вариант приемлем только для маломощных модификаций, в промышленных установках подобного отвода тепла уже недостаточно. В большинстве электродвигателей реализована схема охлаждения за счет самовентиляции. Благодаря созданию воздушных потоков скорость отвода тепла от нагретых деталей повышается на порядок. Для этой цели на вал двигателя с нерабочей стороны устанавливается крыльчатка, действующая по принципу обычного вентилятора. В отдельных случаях создание устойчивых воздушных потоков обеспечено конструкцией самого ротора. Различают два основных типа системы охлаждения:

- Наружная самовентиляция – поток охлаждающего воздуха проходит вдоль поверхности корпуса электродвигателя, который для увеличения теплоотдачи имеет специальное оребрение. Увеличение площади соприкосновения позволяет обеспечить более эффективный отвод тепловой энергии.
- Внутренняя самовентиляция – воздушный поток циркулирует между основными конструктивными элементами по специальным каналам. Благо-

даря такому решению тепловая энергия отбирается непосредственно с нагретых обмоток и деталей двигателя, что позволяет поддерживать требуемую температуру даже при работе с максимально допустимой мощностью.

Для большинства электродвигателей, работающих с постоянной частотой вращения ротора, этот вариант считается наиболее простым. Но при системах, для которых требуется регулировка скорости, такой вариант уже неэффективен, и требуется применение принудительного охлаждения.

### Принудительное охлаждение

Принцип системы заключается в том, что частота вращения крыльчатки вентилятора не зависит от режима работы самого двигателя. Вентилятор обеспечен отдельным двигателем. Поэтому при работе в режимах с небольшим количеством оборотов ротора производительность системы охлаждения не снижается. Особенно актуален такой тип охлаждения для электродвигателей с частотными преобразователями и другими регуляторами частоты вращения ротора. Практически все электродвигатели постоянного тока комплектуются охлаждающими устройствами такого же типа. При этом наиболее эффективными считают замкнутые системы охлаждения, в том числе и с жидкостными воздухоохладителями. Воздух при этом циркулирует по замкнутой системе между электродвигателем и воздухоохладителями, благодаря чему отпадает необходимость в его постоянной очистке.

### Особенности систем охлаждения синхронных электродвигателей

В синхронных электродвигателях различной мощности чаще всего реализована система охлаждения проточного (продуваемого) типа. Воздух, необходимый для отвода тепла, забирается из машинного зала, проходит через электродвигатель, нагревается и удаляется за пределы рабочей зоны. В отдельных случаях применяют схемы, при которых охлаждаю-

щий воздух забирается непосредственно у места установки электродвигателя и отводится из рабочей зоны по вентиляционной сети. В отдельных случаях тепловую энергию воздуха используют в системах рекуперации, позволяющих организовать обогрев других производственных и бытовых помещений.

### Системы охлаждения асинхронных двигателей

Для асинхронных двигателей большой мощности чаще всего реализованы системы охлаждения с замкнутым циклом. При этом воздухоохладители могут монтироваться как в опорном фундаменте электрической машины, так и на ее корпусе [1].

### Электродвигатели с принудительным водяным охлаждением

Достаточно часто на предприятиях встречаются задачи, когда из-за особенностей технологического процесса производства невозможен естественный отвод тепловой энергии от рабочих узлов электродвигателя, а использование принудительного воздушного охлаждения нецелесообразно из-за его громоздкости и неэффективности.

В данном случае единственно возможным вариантом решения – это использование контура водяного охлаждения. Данная проблема особенно актуальна для технологических процессов с высоким температурным режимом (при производстве цемента, кирпича, строительных материалов, в металлургии, на стекольных заводах и т.д.). Принудительное охлаждение электродвигателей в значительной степени расширяет диапазон регулирования скорости двигателя [2]. Электродвигатели с водяным охлаждением представляют собой современное высокотехнологичное решение, практически не зависящее от условий эксплуатации. Двигатели данного типа могут использоваться в ограниченном пространстве, в том числе на площадках, где предусмотрено техобслуживание двигателя без демонтажа.

Водяное охлаждение представляет собой очень эффективную систему для удаления тепла, производимого двигателем. Эта система позволяет значительно снизить размеры и вес двигателя. Эффективность системы водяного охлаждения не зависит от скорости вращения двигателя, поэтому особенно подходит для работы приводов с постоянным крутящим моментом. Водяное охлаждение предпочтительнее воздушного охлаждения в электродвигателях большой мощности, так как электродвигатели большой мощности выделяют много тепловой энергии, которую необходимо быстро отводить для поддержания приемлемой температуры электродвигателя. Ес-

ли температура двигателя не контролируется эффективно, это может привести к разрушению и повреждению самого электродвигателя.

Водяное охлаждение позволяет также: снизить передачу тепла в помещение установки двигателя; снизить передачу шума; снизить вибрации, передаваемые полу; избежать образования пыли в помещении; снизить размеры машины.

Первый способ охлаждения состоит в том, что конструкция электродвигателя выполнена таким образом, что охлаждение обеспечивается «водяной рубашкой» корпуса электродвигателя, в каналах которого циркулирует хладагент, что позволяет более эффективно осуществлять теплообмен и приводит к получению более высокой мощности при том же весе, и поэтому уменьшает размер двигателя. Эта система идеально подходит для использования в двигателях с переменной скоростью, так как охлаждение оптимизировано даже на пониженной скорости и там, где имеется ограничение пространства для размещения двигателя.

Сечение статора электродвигателя с принудительным водяным охлаждением, конструкция корпуса которого выполнена с продольными каналами для хладагента, показано на рис. 1.

Суть второго способа охлаждения обмоток статора состоит в том, что в статоре электрической машины сердечник статора, включающий пакеты электротехнической стали и установленные между ними тепловые элементы с каналами для охлаждения жидкости, установлен в кожухе герметично. При этом, согласно изобретению, тепловые элементы со стороны кожуха на частичной радиальной глубине выполнены уменьшенной толщины, образуя кольцевые каналы между пакетами, и снабжены с обеих сторон уплотнительными кольцами, с одной стороны внутреннего диаметра кожуха выполнен аксиальный канал с перегородками, разделяющими кольцевые каналы на группы,

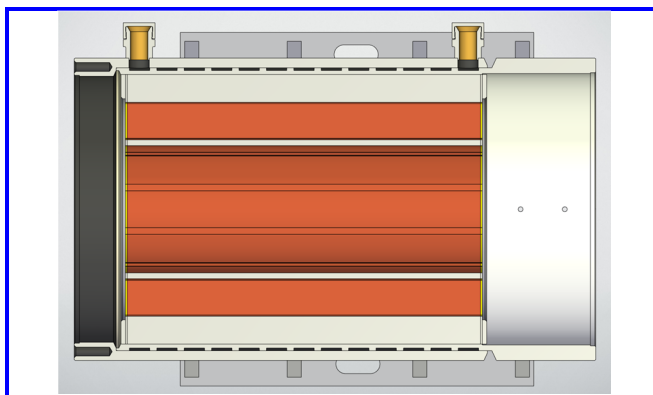


Рис. 1. Сечение статора электродвигателя с принудительным водяным охлаждением с каналами потока охлаждающей жидкости (хладагента) в корпусе электродвигателя

с противоположной стороны кожуха выполнен другой аксиальный канал с другими разделяющими перегородками, оба канала с соответствующими перегородками образуют цепное соединение групп каналов и снабжены входным и выходным патрубками [3]. Данный способ позволяет уменьшить трудоемкость изготовления статора при одновременном повышении его надежности.

В состав электрической машины с водяным охлаждением входят тепловые элементы, состоящие из двух частей с каналами для охлаждающей жидкости. Они отводят тепловую энергию от статора, которая возникает в процессе работы электродвигателя. Тепловые элементы выполняются из однородных материалов.

Трехмерная модель сектора теплового элемента отдельно и теплового элемента, выполненного методом диффузионной сварки и в составе статора электрической машины с принудительным водяным охлаждением, представлена на рис. 2, 3 и 4, а фото изготовленного статора с применением тепловых элементов и штуцеров для подвода/отвода хладагента, выполненных методом диффузионной сварки, – на рис. 5.

Для создания таких крупногабаритных тепловых элементов для электрических машин с принудительным водяным охлаждением требуется специальное оборудование – машины диффузионной сварки в вакууме с большими максимальными габаритными размерами и большими внутренними размерами сварочной камеры. В настоящее время такое сварочное оборудование отечественного производства отсутствует. Предлагается проработать основные параметры и проектные характеристики будущего сварочного оборудования для диффузионной сварки тепловых элементов электрических машин с принудительным водяным охлаждением.

При диффузионной сварке должна обеспечиваться возможность сборки и сжатия деталей сварочным усилием, создания вокруг детали вакуума, нагрева зоны сварки и выдержки нагретых деталей в вакууме. Этими требованиями определяется типовая конструкция установок для диффузионной сварки, представленная на рис. 6. Установка состоит из камеры 1, смонтированной на основании 2. Внутри камеры 1 на столе 3 устанавливают свариваемые детали 4. На них давит шток 5, соединенный с поршнем 6 цилиндра 7, питаемого гидравлической системой 8. В зоне стыка деталей 4 установлен нагреватель 9, подключенный к источнику тока 10. Из камеры 1 воздух откачивают вакуумной системой 11, состоящей из форвакуумного и высоковакуумного насосов, трубопроводов, вентиля и приборов для измерения остаточного давле-

ния в камере. В стенках камеры имеется загрузочный люк 12 и смотровое окно 13 для наблюдения за процессом сварки. Камера снабжается системой водяного охлаждения 14.

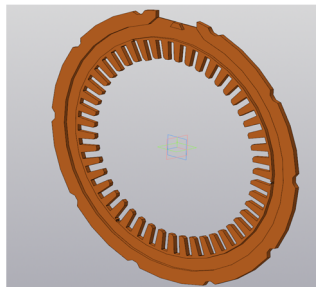


Рис. 2. Трехмерная модель сектора теплового элемента

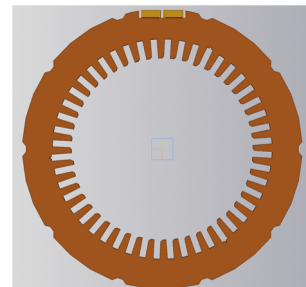


Рис. 3. Трехмерная модель теплового элемента, состоящего из двух секторов с входным и выходным патрубком

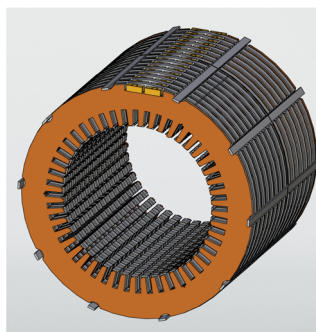


Рис. 4. Трехмерная модель теплового элемента в составе статора электрической машины с принудительным водяным охлаждением



Рис. 5. Фото статора электрической машины с принудительным водяным охлаждением с применением тепловых элементов

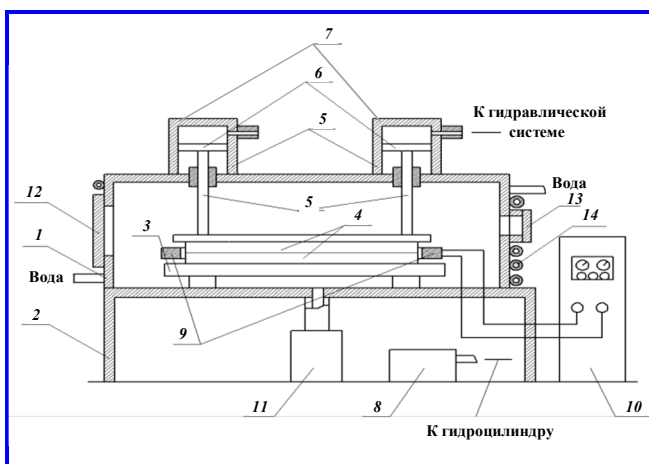


Рис. 6. Схема типовой установки для диффузионной сварки: 1 – корпус камеры; 2 – основание; 3 – стол; 4 – свариваемые детали; 5 – шток; 6 – поршень; 7 – цилиндр; 8 – гидравлическая система; 9 – нагреватель; 10 – источник тока; 11 – вакуумная система; 12 – загрузочный люк; 13 – смотровое окно; 14 – система водяного охлаждения

Рабочая вакуумная камера, в которой размещаются свариваемое изделие, нагреватели, механизм давления, выполняется обычно цилиндрической или прямоугольной формы из коррозионностойкой стали. Стенки водоохлаждаемые. Свариваемое изделие может располагаться на специальной опоре или в приспособлении. Для увеличения производительности могут предусматриваться несколько камер с целью получения непрерывной загрузки и выгрузки заготовок и изделий (камеры шлюзования). В большинстве случаев установка имеет одну камеру [4]. Для проектируемого сварочного оборудования выбрана установка с одной вакуумной рабочей камерой.

По степени вакуумирования различают установки с низким вакуумом (до  $10^{-2}$  мм рт. ст.), со средним вакуумом ( $10^{-3}$  ...  $10^{-5}$  мм рт. ст.), с высоким вакуумом (свыше  $10^{-5}$  мм рт. ст.) и с пониженным или повышенным давлением защитного газа (с контролируемой атмосферой). По объему вакуумирования различают установки с полным (общим) и местным вакуумированием, при котором в камеру помещают не всю деталь, а только место сварки, что позволяет сваривать длинные прутки, профили, трубы с локальной защитой зоны сварки от воздуха. Для проектируемого сварочного оборудования выбрана установка с высоким вакуумом (свыше  $10^{-5}$  мм рт. ст.) и с полным вакуумированием.

Нагрев при диффузионной сварке можно осуществлять любыми источниками тепла, например, электронным лучом, дугой, световым лучом. Чаще всего применяют индукционный нагрев токами высокой частоты, электроконтактный нагрев током, пропускаемым через свариваемые детали, или радиационный нагрев электронагревателем [5]. Для проектируемого сварочного оборудования выбран индукционный нагрев, так как его целесообразно применять как для крупногабаритных деталей (с использованием промышленной частоты), так и для мелких, тонких (с использованием высокой частоты).

Давление сжатия способствует формированию фактического контакта соединяемых поверхностей, а также их активации. Давление выбирают в диапазоне 0,8 ... 0,9 МПа предела текучести при температуре сварки. Для известных конструкционных материалов оно может изменяться в диапазоне 1 ... 50 МПа. Для сварки тугоплавких и твердых материалов эти значения могут быть в несколько раз выше, поэтому для проектируемого сварочного оборудования выбрано несколько характеристик усилия сжатия для свариваемых деталей.

Внутренние размеры сварочной камеры без нагревателей и «рубашки» охлаждения выбраны с учетом возможности сваривать образцы и детали с размерами в широком диапазоне.

Температура сварки является основным параметром процесса, она определяет условия термовакуумной очистки и образование физического контакта соединяемых поверхностей, лимитирует скорость и характер протекания объемного диффузионного взаимодействия [6].

При соединении разнородных материалов расчет ведется по температуре плавления наиболее легкоплавкого из них. В случае появления эвтектики температуру сварки выбирают ниже температуры ее плавления. Выбранная температура сварки дает возможность сваривать детали различной величины температуры плавления материала.

Время выдерживания давления зависит от таких факторов, как температура сварки, давление, класс обработки соединяемых поверхностей и от пластичности материала. Исходя из этого, время прижимания может составлять от нескольких секунд до нескольких часов, но в большинстве случаев составляет 5 – 10 минут.

Таблица

**Характеристики сварочного оборудования для диффузионной сварки тепловых элементов электрических машин с принудительным водяным охлаждением**

Параметры разрабатываемого оборудования	Характеристики
Число вакуумных рабочих камер	1
Внутренние размеры сварочной камеры без нагревателей и «рубашки» охлаждения, мм	1800 × 1600 × 600
Усилие сжатия свариваемых деталей, Кн/м <sup>2</sup> (КПа):	
– I ступень	100 – 400
– II ступень	400 – 4000
– III ступень	4000 – 8000
Максимальные габаритные размеры свариваемых деталей, мм:	
– решетчатых	1600 × 1400 × 500
– плоских	1500 × 1500 × 300
Рабочий вакуум в камере, мм. рт. ст.	$5 \cdot 10^{-5}$
Температура сварки в зависимости от технологического режима, °С	От 200 – 300 до 1500 – 1600
Продолжительность сварки – ступенчато, мин	От 2 до 30
Потребляемая электрическая мощность без высокочастотного генератора, кВт	25
Выходная мощность источника нагрева свариваемых деталей – ступенчато, кВт	От 400 до 2500

Любая установка диффузионной сварки должна иметь эффективное охлаждение. Интенсификация процессов теплопередачи достигается применением водяного охлаждения для опор, камер, промежуточных штоков и продувки рабочих объемов инертными газами [7].

Комплекс этих условий предопределяет характеристики будущего сварочного оборудования для диффузионной сварки тепловых элементов электрических машин с принудительным водяным охлаждением. В итоге получены следующие характеристики, приведенные в таблице.

### Заключение

Водяное охлаждение предпочтительнее воздушного охлаждения в электродвигателях большой мощности, так как электродвигатели большой мощности выделяют много тепловой энергии, которую необходимо быстро отводить для поддержания приемлемой температуры электродвигателя. В состав электродвигателей с водяным охлаждением входят тепловые элементы. Они отводят тепловую энергию, которая возникает в процессе работы электродвигателя. Для создания крупногабаритных тепловых элементов электрических машин (генераторов, электродвигателей, турбокомпрессоров и пр.) с принудительным водяным охлаждением требуется специальное оборудование – машины диффузионной сварки в вакууме с большими максимальными габаритными размерами и большими внутренними размерами сварочной камеры, в настоящее время такое сварочное оборудование отечественного производства отсутствует. Результаты данной работы могут рассматриваться как предпроектная проработка сварочного оборудования диффузионной

сварки тепловых элементов крупных электрических машин с принудительным водяным охлаждением.

### Литература

1. Федорова И. А. Способы охлаждения электродвигателей / И. А. Федорова // Теоретический и практический потенциал современной науки : сборник научных статей. – Москва : Перо, 2020. – Ч. VI. – С. 144 – 148.
2. Двигатели с водяным охлаждением // АГ Энерго-Холдинг [сайт]. – 2006 – URL : <http://agenergo.ru/products/catalog/147/981/>.
3. Патент № 2347308 С2 Российская Федерация, МПК Н02К 9/19 (2006.01), Н02К 1/20 (2006.01). Статор электрической машины : № 2006129606/09; заявл. 15.08.2006; опубл. 20.02.2008 / Глазков В. П., Обухов В. А., Удалцов А. В., Юрьев Ю. П. – Бюл. № 5.
4. Вашуков Ю. А. Термомеханические способы сварки : [учеб. пособие] / Ю. А. Вашуков ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). – Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2019. – URL : <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-izdaniya/Termomechanicheskie-sposoby-svarki-Elektronnyiresurs-ucheb-posobie-....pdf>.
5. Сварка и резка материалов : учеб. пособие для нач. проф. образования / М. Д. Банов, Ю. В. Казаков, М. Г. Козулин [и др.] ; под ред. Ю. В. Казакова. – 3-е изд., стер. – Москва : Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
6. Гришин И. С. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов между собой и с конструкционными сталями : [конспект лекций] / И. С. Гришин. – Куйбышев : КуАИ, 1981. – 35 с. [1] : илл. – URL : <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-izdaniya/Diffuzionnaya-svarka-zharoprochnyh-splavov-mezhdu-soboi-i-s-konstrukcionnymi-stalyami-konspekt-lekcii-Tekst-elektronny-....pdf>.
7. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1976. – 312 с.

Поступила в редакцию 14.10.2022

*Александр Иванович Мизин, главный технолог, т. 8 (903) 229-26-06, e-mail: aimizin@vei.ru.  
Татьяна Игоревна Сокирко, инженер-технолог, т. 8 (999) 615-35-82, e-mail: tibessonova@vei.ru.  
(ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»).*

## PRACTICAL APPLICATION OF DIFFUSION WELDING TECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF LARGE ELECTRIC MACHINES

A. I. Mizin, T. I. Sokirko

*The article discusses the principles of self-ventilation of electric motors, the problems of forced air cooling, the advantages of electric motors with forced water cooling, the role of thermal elements in electric motors with forced water cooling and the prospect of creating welding equipment of domestic production for diffusion welding of large thermal elements are considered.*

**Key words:** vacuum diffusion welding, electrical machines with forced water cooling, welding of thermal elements, machine for vacuum diffusion welding, machine for welding of thermal elements.

### References

1. Fedorova I. A. Methods of cooling electric motors / I. A. Fedorova // Theoretical and practical potential of modern science Collection of scientific articles. – Moscow : Pero Publishing House, 2020. – Vol. Ch. VI. – P. 144 – 148.

2. Engines with water cooling // AGENergoHolding [website]. – 2006 – 2023. Available at: <http://agenergo.ru/products/catalog/147/981/>.
3. Patent No. RU 2347308 C2, IPC H02K 9/19 (2006.01), H02K 1/20 (2006.01). Marine machinery stator : No. 2006129606/09 ; appl. 15.08.2006 ; published 20.02.2008 / Glazkov V. P., Obukhov V. A., Udaltsov A. V., Yuriev Yu. P. – Bull. No. 5.
4. Vashukov Yu. A. Thermomechanical welding : [textbook] / Yu. A. Vashukov ; Ministry of Science and Higher. education Ros. Federation, Samar. nat. research un-t im. S. P. Koroleva (Samar. University). – Samara: Samar Publishing House. un-ta, 2019. – Available at: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-izdaniya/Termomehanicheskie-sposoby-svarki-Elektronnyi-resurs-ucheb-posobie-....pdf>.
5. Welding and cutting materials : proc. Allowance for the beginning. prof. education / M. D. Banov, Yu. V. Kazakov, M. G. Kozulin [et al.] ; ed. Yu. V. Kazakov. – 3rd ed., erased. – Moscow : Publishing Center «Academy», 2003. – 400 p.
6. Grishin I. S. Diffusion welding of heat-resistant alloys between themselves and with structural steels : [конспект лекций] / I. S. Grishin. – Kuibyshev : KuAI, 1981. – 35 p. [1] : ill. – Available at: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-izdaniya/Diffuzionnaya-svarka-zharoprochnyh-splavov-mezhdu-soboi-i-s-konstrukcionnymi-stalyami-konspekt-lekcii-Tekst-elektronnyi-....pdf>.
7. Kazakov N. F. Diffusion welding of materials / N. F. Kazakov. – 2nd ed., revised. and additional. – Moscow : Engineering, 1976. – 312 p.

*Aleksandr Ivanovich Mizin, Chief Process Engineer, tel.: +7 (903) 229-26-06, e-mail: aimizin@vei.ru.*

*Tatiana Igorevna Sokirko, Process Engineer, tel.: +7 (999) 615-35-82, e-mail: tibessonova@vei.ru.*

*(All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of «RFNC-VNIITF named after academician E. I. Zababakhin»).*