

**БИБЛИОТЕКА
ЭЛЕКТРОТЕРМИСТА**

В ы п у с к 74

Основана в 1959 году

**Ю. А. БЕЛАВИН М. А. ЕВСТИГНЕЕВ
А. Н. ЧЕРНЯВСКИЙ**

**ТРУБЧАТЫЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
НАГРЕВАТЕЛИ
И УСТАНОВКИ
С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ**



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1989

ББК 31.292
Б43
УДК 621.365

Редакционная коллегия серии:

А.С. Бородачев, Л.Е. Никольский, А.А. Простяков,
Ю.Л. Рыжнев, А.Д. Свенчанский, М.А. Шевцов

Рецензент канд. техн. наук В.С. Сельский

Белавин Ю.А. и др.

Б43 Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением / Ю.А. Белавин, М.А. Евстигнеев, А.Н. Чернявский. — Энергоатомиздат, 1989. — 160 с.: ил. — (Б-ка электро-термиста; Вып. 74)

ISBN 5-283-00509-7

Приведены сведения о конструкции, особенностях работы и областях применения трубчатых электрических нагревателей и нагревательных кабелей. Описаны методики электрического и теплового расчетов трубчатых электрических нагревателей. Освещены вопросы надежности и долговечности работы нагревателей и электронагревательных установок. Даны рекомендации по их хранению и эксплуатации.

Для инженеров и техников, занимающихся эксплуатацией и проектированием трубчатых электрических нагревателей, нагревательных кабелей и электротермических установок.

Б 2302050000-416 196-88
051 (01)-89

ББК 31.292

Производственное издание

Белавин Юрий Александрович, Евстигнеев Марк Александрович, Чернявский Анатолий Никифорович

ТРУБЧАТЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ И УСТАНОВКИ С ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ

Редактор М. Г. Пронько. Зав. редакцией М. П. Соколова

Редактор издательства Т. Н. Платова.

Художественные редакторы А.А. Белоус, В.А. Гозак-Хозак.

Технический редактор Т.Н. Тюрина. Корректор С.В. Малышева

ИБ № 2936

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 10.03.89. Т-08938. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печл. 9,80. Усл.кр.-отт. 10,04. Уч.-издл. 10,77. Тираж 16 000 экз. Заказ 6660. Цена 55 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография" Союзполиграфпрома при Госкомиздате СССР. 113054, Москва, М-54, Валуевская, 28.

ISBN 5-283-00509-7

© Энергоатомиздат, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Трубчатые электронагреватели (тэны) являются одними из самых распространенных видов технологического оборудования, применяемого в различных отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту.

Выпуск тэнов за последние 20 лет возрос в 15 раз, за это же время их средний ресурс увеличился в 2—3 раза при одновременном снижении удельной материалоемкости. Массовое применение тэнов и значительная доля потребления электроэнергии этими нагревателями в энергетическом балансе страны обуславливают необходимость повышения технического уровня и экономичности при их изготовлении и эксплуатации.

В последние годы значительно изменились технология производства тэнов, методы их расчета, и активизировалось решение вопросов, связанных с рациональным использованием материалов и комплектующих изделий, впервые в отечественной практике начато освоение нагревателей патронного типа и плоского сечения; повышено также качество комплектующих изделий и материалов, прежде всего электротехнического периклаза, существенно изменились их характеристики, требования к входному контролю и т.п.

Второе издание книги Г.Р. Миндина "Электронагревательные трубчатые элементы", выпущенное в 1965 г. издательством "Энергия" не отражает указанных изменений, в связи с чем возникла необходимость выпуска новой книги, освещающей современные тенденции в проектировании, производстве и эксплуатации тэнов.

В данной работе приведены характеристики наиболее предпочтительных и перспективных материалов для изготовления нагревателей, изложен новый метод расчета тэнов, учитывающий как теплотехнические, так и электроизоляционные характеристики наполнителя, даны краткие сведения по передовой технологии производства нагревателей и основному оборудованию, необходимому для изготовления как традиционных нагревателей, так и тэнов патронного типа и плоского сечения. Рассмотрены вопросы монтажа и эксплуатации нагревательных устройств на базе тэнов.

В книге приведены также краткие сведения о проектировании, изготовлении и эксплуатации нагревательных кабелей с трубчатой оболочкой и минеральной изоляцией.

Авторы выражают благодарность рецензенту канд. техн. наук В.С. Сельскому и редактору канд. техн. наук М.Г. Пронько за полезные советы и указания, которые способствовали улучшению рукописи, а также доктору техн. наук М.Б. Гутману и инж. В.И. Колобовникову за оказанную помощь в работе.

Все пожелания по содержанию книги авторы просят направлять в адрес Энергоатомиздата: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

ТРУБЧАТЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ КАБЕЛИ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трубчатый электронагреватель представляет собой расположенную внутри металлической оболочки спираль (или несколько спиралей) из сплава высокого сопротивления с контактными стержнями. От стенок оболочки спираль изолирована спрессованным электроизоляционным наполнителем. Для предохранения наполнителя от проникновения влаги из окружающей среды торцы тэна герметизируют.

В отличие от тэнов в нагревательных кабелях вместо спирали в электроизоляционный наполнитель запрессовывают одну или несколько металлических жил. Наиболее распространенная конструкция двухконцевого круглого тэна приведена на рис. 1; на рис. 2 изображены нагревательные кабели.

По конфигурации, конструктивному исполнению и назначению тэны отличаются большим многообразием. Отечественная промышленность выпускает более тысячи типоразмеров тэнов. Большое разнообразие таких нагревателей объясняется широким диапазоном их параметров: по рабочему напряжению от 12 до 660 В (специальное исполнение — до нескольких тысяч вольт); по мощности от десятков ватт до десятков киловатт; по длине от нескольких сантиметров до 6,3 м. По конфигурации тэны выпускаются как прямые, так и согнутые в разных плоскостях с большим разнообразием формгиба (U-образные, спиралеобразные и т.д.) (рис. 3.).

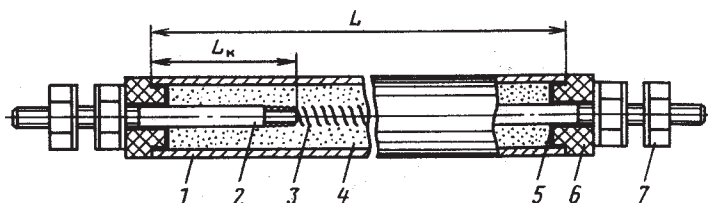
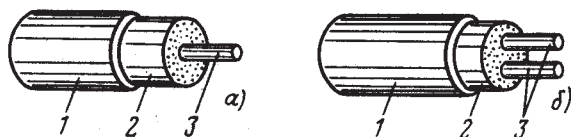


Рис. 1. Трубчатый электронагреватель:

1 — оболочка; 2 — контактный стержень; 3 — нагревательный элемент (спираль); 4 — электроизоляционный наполнитель; 5 — герметик; 6 — изолятор; 7 — контактное устройство (L — развернутая длина тэна, L_k — длина контактного стержня в заделке)



Р и с . 2. Нагревательные кабели:

а — с одной токопроводящей жилой; *б* — с двумя токопроводящими жилами (*1* — оболочка; *2* — электроизоляционный наполнитель; *3* — токопроводящая жила)

Тэны разделяют на следующие виды:

двухконцевые круглого сечения с контактными стержнями, расположенными с двух сторон тэна (рис. 4, *а*);

круглого сечения с контактными стержнями (рис. 4, *б*), расположенными в одну сторону (патронного типа);

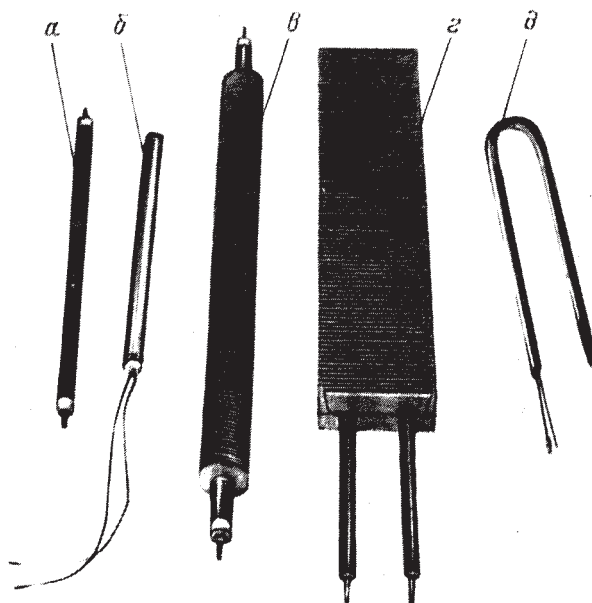
двухконцевые оребренные (рис. 4, *в*, *г*);

плоского сечения (рис. 4, *д*).

Трубчатые нагреватели выпускают также в виде блоков, состоящих из двух и более тэнов, концы которых закреплены на общем фланце, а контактные выводы электрически соединены в одно нагревательное устройство мощностью до нескольких сотен киловатт. Имеются на-



Р и с . 3. Примеры конфигурации тэнов



Р и с. 4. Основные виды тэнов по исполнению

гревательные устройства, в которых тэны залиты металлом (алюминий, чугун и др.) в формы различной конструкции и конфигурации.

По назначению и способности работать в различных средах тэны также отличаются большим разнообразием: рабочая температура на их оболочке колеблется от десятков градусов (при нагреве воды и других жидких сред) до 750°C (при нагреве газовых сред), а специальные исполнения тэнов допускают их применение и при более высоких температурах.

В зависимости от материала оболочки (алюминий, медь, углеродистая и нержавеющая стали) и наличия специальных покрытий оболочки тэны способны работать в самых разнообразных средах, включая агрессивные, в том числе растворы щелочей, кислот и т.д.

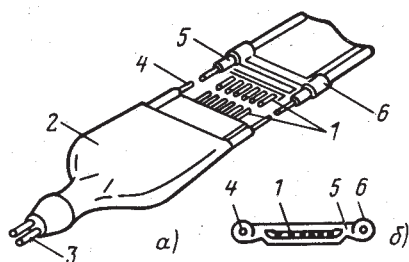
Для различных условий работы (рабочей температуры, агрессивности среды и др.) и назначения ресурс тэнов меняется от 3 до 12 и более тысяч часов.

Одним из многих преимуществ тэнов по сравнению с другими видами нагревателей является их надежная защита от поражения электрическим током обслуживающего персонала при различных механических воздействиях. Сопротивление изоляции между нагревательной спиралью

и металлической оболочкой тэна практически не зависит от внешних механических воздействий и агрессивности рабочей среды (растворов щелочей, кислот и др.). Это обстоятельство позволяет применять тэны как в промышленных установках с обязательным заземлением металлической оболочки, так и в электробытовых приборах, не имеющих защитного заземления. Однако во всех без исключения случаях применения тэнов необходимо выполнение дополнительных мер по обеспечению их электробезопасности, позволяющих защитить обслуживающий персонал от поражения электрическим током, проходящим по контактными стержням.

При относительно высокой трудоемкости производства тэнов и использовании для их изготовления дорогостоящих и остродефицитных материалов (электротехнического периклаза, сплавов высокого сопротивления, высоколегированных тонкостенных нержавеющей и углеродистых труб) большое значение имеет правильный выбор областей рационального применения тэнов. В некоторых случаях более предпочтительным является применение ряда других нагревателей, таких, как гибкие поверхностные нагреватели (маты, полосы, обручи и т.п.) с изоляцией, состоящей из керамических втулок или элементов замкового типа и из ленты или проволоки из сплава высокого сопротивления; гибкие ленточные электронагреватели с текстильной заделкой сплава сопротивления в изоляцию из термостойких стеклонитей и наружным защитным покрытием из термостойкой резины, пластмассы или пропиточного органосиликатного компаунда; гибкие греющие провода и кабели с изоляцией из термостойких стеклонитей и наружной оболочкой из кремнеорганической резины или металла; электронагреватели со сплавом сопротивления, нанесенным электрохимическим, плазменным или другим способом на диэлектрическое основание. Предельная температура эксплуатации таких нагревателей зависит от материалов, использованных при их изготовлении. При применении полиэфирного волокна предельная температура эксплуатации не превышает 150°C ; стеклоткани, пропитанной фенольными или другими смолами, резины на основе силиконового каучука — $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$; стеклонитей из алюмоборсиликатного стекла, пропитанных органосиликатным компаундом, — 400°C . В СКБ "Транснефтеавтоматика" разработано несколько модификаций гибких ленточных нагревателей типа ЭНГЛ-180, НТЛ-400, НТЛ-600, предназначенных для эксплуатации при температурах соответственно до $180, 400, 600^{\circ}\text{C}$ [1].

Нагреватель ЭНГЛ-180 (элемент нагревательный гибкий ленточный) состоит из стеклоплотной основы, в которой параллельно проложены жилы из сплава высокого сопротивления. Поверх плетеной основы наложена герметизирующая оболочка из кремнийорганической резины. Нагреватели ЭНГЛ-180 выпускаются с двумя токоведущими проводами (рис. 5), с одним проводом, а также без токоведущих проводов.



Р и с. 5. Нагреватель ЭНГЛ-180:

a — общий вид; *б* — сечение (1 — жилы; 2 — концевая заделка; 3 — вывод; 4 — токоведущий провод; 5 — герметизирующее покрытие; 6 — скобка)

Жилы и токоведущие провода коммутируются между собой с помощью механического обжатия или пайки.

Использование различных схем коммутации жил и токоведущих проводов позволяет получать нагреватели, отличающиеся широким диапазоном мощностей и длин. Токоведущие провода позволяют осуществлять последовательное соединение нескольких нагревателей и получать мощность до 5,5 кВт.

Технические данные нагревателей ЭНГЛ-180 (без токоведущих проводов):

Рабочее напряжение	220 или 380 В
Мощность	0,17—2,1 кВт
Длина	От 2,55 до 33,12 м
Ширина	30 мм
Толщина	3 мм

Электрическая изоляция нагревателей должна выдерживать испытание напряжением 1500 В, сопротивление электрической изоляции в холодном состоянии должно быть не менее 10^6 Ом. Нагреватели должны выдерживать не менее четырех изгибов на угол 180° вокруг цилиндра радиусом, равным пятикратной толщине активной части нагревателя [10].

Нагреватели НТЛ-400 и НТЛ-600 (нагреватели теплостойкие ленточные) имеют одинаковую конструкцию и состоят из плетеной стеклоленты, пропитанной органосиликатным материалом. В основе плетеной стеклоленты уложены нагревательные провода из сплава высокого сопротивления. Их соединение между собой и с низкотемпературными выводами осуществляется пайкой твердыми припоями в концевых заделках. Выводы нагревателей изготавливают из никелевой многопроволочной жилы, обмотанной стеклонитью и покрытой кремнийорганической резиной (НТЛ-400) или пропитанной органосиликатным материалом. Эти же нагреватели обозначаются ЭНГЛУ-400 и ЭНГЛУ-600.

Технические данные нагревателей НТЛ:

Рабочее напряжение	220 или 380 В
Мощность	1,02—5,45 кВт
Длина	от 4,3 до 24,4 м
Ширина	22 мм
Толщина	2,5 мм

Соппротивление электрической изоляции нагревателей должно быть не менее 10^6 Ом в холодном (при температуре окружающей среды 25 ± 10 °С и относительной влажности до 60 %) и горячем состоянии (при температуре 400 ± 10 °С для НТЛ-400 и 600 ± 10 °С для НТЛ-600). Нагреватели должны выдерживать испытательное напряжение 1500 В переменного тока частотой 50 Гц в течение 3 мин. Изоляция активной части нагревателей должна выдерживать не менее четырех изгибов на угол 180 °С вокруг цилиндра радиусом, равным десятикратной толщине активной части. Нагреватели должны быть стойки к воздействию пониженных температур (до минус 60 °С).

В отдельных случаях, при более низких (в 2–3 раза) удельных мощностях нагревателей, целесообразно применение наборных, которые отличаются от тэнов наличием менее дорогостоящего изоляционного слоя из керамических втулок.

Большие объемы выпуска тэнов диктует необходимость совершенствования их конструкции, повышения уровня технологии и снижения материально-трудовых затрат на производство. Так, в результате совершенствования конструкции, улучшения качества материалов и технологии производства средний ресурс тэнов, применяемых для нагрева наиболее распространенных сред (вода, воздух), был увеличен с 3–3,5 тыс. ч в 1970 г. до 7–11 тыс. ч в 1980–1983 гг.; дальнейшее повышение ресурса тэнов на каждый процент дает экономию в сотни тысяч рублей. Согласно ГОСТ 2706-86 "Электронагреватели трубчатые (ТЭН). Общие технические требования" к 1991 г. средний ресурс некоторых типов тэнов возрастет на 50% и более. Большой народнохозяйственный эффект имеет место и при улучшении технологии изготовления тэнов, прежде всего в направлении снижения их материалоемкости. Осуществляемые в настоящее время мероприятия по снижению диаметров многих типов тэнов с 13–18 и 10 мм и ниже позволят уменьшить расход остродефицитных материалов в 1,5–2 раза.

Кабели с трубчатой оболочкой и минеральной изоляцией имеют различное техническое назначение: нагрев жидких и газообразных сред (нагревательные кабели), измерение температур (термопарные кабели); контролирование температур (термочувствительные кабели); передача сигналов в ядерных реакторах (радиационно-стойкие кабели); передача энергии высокой частоты (радиочастотные кабели) и др. Перечисленные кабели объединены под общим названием жаростойкие кабели. Диапазон их конструктивных параметров достаточно широк: число жил от 1 до 19; сечение жил от 0,025 до 1,2 мм²; диаметры оболочек от 0,9 до 22,5 мм; длины кабелей от 20 до нескольких сотен метров; материал оболочек — медь, нержавеющая сталь, жаропрочный сплав; материал жил — медь, нержавеющая сталь, нихром и др.

Нагревательные кабели, выпускаемые с оболочкой из нержавеющей стали диаметром от 2 до 6 мм и жилами из нихрома (а также никеля и нержавеющей стали), в целом ряде случаев являются наиболее пред-

почтительным типом нагревателя, а иногда и единственным, позволяющим обеспечить требуемые температурные режимы нагревательного устройства. Комплектующие материалы для изготовления нагревательных кабелей с трубчатой оболочкой и минеральной изоляцией практически такие же, что и для изготовления тэнов, а сложность технологического процесса, трудоемкость изготовления и дефицит кабелей более значительны, чем у тэнов, поэтому применение нагревательных кабелей для нагревательных устройств допустимо только в тех случаях, когда тэны, а также другие виды низкотемпературных нагревателей неприемлемы.

В настоящей главе приведены рекомендации по конструированию тэнов и выбору материалов, способствующие повышению технического уровня и технико-экономических показателей нагревателей, а также основные сведения по конструкции и технологии изготовления нагревательных кабелей.

2. КОНСТРУКЦИИ НАГРЕВАТЕЛЕЙ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Двухконцевые круглые тэны. Основные технические параметры (мощность, длина, диаметр и др.) серийно выпускаемых тэнов общепромышленного и бытового назначения регламентированы ГОСТ 13268-83 "Электронагреватели трубчатые" и ГОСТ 19108-81 "Электронагреватели трубчатые (ТЭН) для бытовых нагревательных электроприборов". Конфигурации, основные геометрические размеры и электротехнические характеристики тэнов общепромышленного назначения (с указанием заводов-изготовителей) приведены в каталоге 12.30.09-86 "Трубчатые электронагреватели". Характеристики ряда нагреваемых сред, условий эксплуатации с соответствующими им материалами оболочек и предельными значениями удельных поверхностных мощностей указаны в табл. 1. Допустимые значения удельных поверхностных мощностей тэнов для конкретных установок получают расчетным путем по общепринятой методике. Полученные значения в зависимости от конкретных условий эксплуатации тэнов могут сильно отличаться от удельных поверхностных мощностей, приведенных в табл. 1 (см. гл. 4).

Тэны общего и бытового назначения изготавливают на номинальные напряжения: 6; 12; 24; 36; 48; 55; 60; 110; 127; 220; 380 В переменного и постоянного тока.

Номинальные мощности тэнов: 0,10; 0,12; 0,16; 0,20; 0,25; 0,32; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,20; 3,50; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00; 10,00; 12,00; 12,50; 16,00; 20,00; 25,00 кВт.

Отклонение мощности тэнов при рабочей температуре должно быть не более +5 % и -10 % номинальной мощности для всех тэнов бытового назначения и тэнов общего назначения с электросопротивлением свыше

Т а б л и ц а 1. Максимальное значение удельной поверхности мощности тэнов в зависимости от эксплуатационных условий и материала оболочки

Условное обозначение нагреваемой среды и материала оболочки	Нагреваемая среда	Материал оболочки	Эксплуатационные условия	Максимальная удельная поверхностная мощность $10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
П ₁	Вода с жесткостью не более 3,0 мг х экв/кг	Нержавеющая жаростойкая сталь	Нагрев и кипячение	9
Р ₂	Вода с жесткостью не более 3,0 мг·экв/кг	Углеродистая сталь	Нагрев и кипячение (долговечность тэнов ниже, чем для среды П ₁)	9
П ₂	Вода с жесткостью более 3,0 мг·экв/кг	Нержавеющая жаростойкая сталь	Нагрев и кипячение	9
П ₃	Слабые растворы кислот (рН = 5 ÷ 7)	То же	Нагрев	15
Р ₄	Слабые растворы щелочей (рН = 7 ÷ 9)	Углеродистая сталь	То же	15
С ₁	Воздух, газы	Углеродистая сталь	Естественная конвекция, температура оболочки до 450 °С	2,2
С ₂	То же	Углеродистая сталь с антикоррозионным и антиадгезионным покрытием	Естественная конвекция, температура оболочки до 450 °С (долговечность тэнов выше, чем для среды С ₁)	2,2
Т ₁	То же	Нержавеющая жаростойкая сталь	Естественная конвекция, температура оболочки до 650 °С	5,0
Т ₂	Воздух и газы (повышенная агрессивность по сравнению с Т ₁)	Высоколегированная нержавеющая сталь	То же	5,0
О ₁	Воздух, газы	Углеродистая сталь	Принудительное движение среды, температура оболочки до 450 °С	5,5
К	То же	Нержавеющая жаростойкая сталь	Принудительное движение среды, температура оболочки до 650 °С	6,5

Т а б л . 1 (продолжение)

Условное обозначение нагреваемой среды и материала оболочки	Нагреваемая среда	Материал оболочки	Эксплуатационные условия	Максимальная удельная поверхностная мощность, $10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$
Л ₁	Литейные формы пресс-формы	Углеродистая сталь	Тэны вставлены в отверстия и пазы с гарантированным контактом не менее 50 % периметра тэна по всей его рабочей длине и тепловым зазором не более 0,05 мм, температура оболочки до 300 °С	4,0
Л ₂	Литейные формы пресс-формы	То же	Тэны вставлены в отверстия и пазы с гарантированным контактом не менее 50 % периметра тэна по всей его рабочей длине и тепловым зазором не более 0,05 мм, температура оболочки до 450 °С (долговечность тэнов ниже, чем для среды Л ₁)	5,0
И ₁	Тяжелые масла и битум	Углеродистая сталь	Температура оболочки до 150 °С	1,0
И ₂	Средневязкие масла	То же	То же	2,0
И ₃	Растительные масла	Углеродистая сталь с антикоррозионным и антиадгезионным покрытием	Температура оболочки до 250 °С	4,5
И ₄	Растительные масла	Нержавеющая жаростойкая сталь	Температура оболочки до 250 °С (долговечность тэнов выше, чем для среды И ₃)	4,5

10 Ом и $\pm 10\%$ — для тэнов общего назначения с электросопротивлением 10 Ом и менее.

Развернутые длины тэнов, равные длинам оболочек нагревателей (без учета длин выступающих контактных стержней), таковы: 0,250; 0,300; 0,360; 0,400; 0,500; 0,600; 0,710; 1,000; 1,200; 1,400; 1,700; 2,000; 2,400; 2,800; 3,350; 4,000; 4,750; 5,600; 6,300 м.

Существенным конструктивным параметром тэнов является длина контактных стержней в заделке (L_K , см. рис. 1), равная размеру за-

глубления каждого контактного стержня в тело тэна относительно конца трубчатой оболочки. Тэны общего назначения изготавливают со следующими номинальными значениями этого параметра: 0,040; 0,065; 0,100; 0,125; 0,160; 0,250; 0,400; 0,630 м (их условные обозначения: А; Б; В; Г; Д; Е; Ж; З соответственно). Длины контактных стержней в заделке тэнов бытового назначения должны быть не менее 0,020 м.

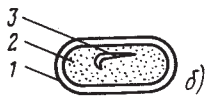
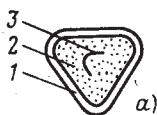
Номинальные диаметры тэнов и соответствующие им предельные отклонения составляют:

Номинальные диаметры, 10^{-3} м	5,0; 6,5; 7,4; 8,0;
	8,5; 10,0
Предельные отклонения, 10^{-3} м	+0,3
	-0,1
Номинальные диаметры, 10^{-3} м	13,0; 16,0; 18,5
Предельные отклонения, 10^{-3} м	+0,4
	-0,2

Сопротивление изоляции тэна в холодном состоянии при приемосдаточных испытаниях необходимо обеспечить максимально высоким, не ниже $2 \cdot 10^7$ Ом. В течение всего срока хранения и эксплуатации при температуре окружающего воздуха $25 \pm 5^\circ\text{C}$ и относительной влажности $65 \pm 15\%$ сопротивление изоляции тэна в холодном состоянии должно быть не менее $5 \cdot 10^5$ Ом. Ток утечки тэна бытового назначения при рабочей температуре должен быть не более 0,5 мА. Сопротивление изоляции тэна в рабочем состоянии (при включении его на номинальное напряжение в той среде, для нагрева которой тэн предназначен) должно быть не менее $5 \cdot 10^5$ Ом.

В зависимости от диаметров тэнов и номинального напряжения, для которого они предназначены, изоляция тэнов в холодном состоянии должна выдержать без пробоя и поверхностного разряда в течение 1 мин испытательное синусоидальное напряжение переменного тока частотой 50 Гц в диапазоне от 600 В (для тэнов диаметром до 6,5 мм и номинальным напряжением до 60 В) до 2000 В (для тэнов диаметром от 13,0 до 18,5 мм и номинальным напряжением до 380 В). В рабочем состоянии изоляция тэнов с номинальным напряжением 110–380 В должна выдерживать испытательное напряжение, равное 1000 В, а тэнов с номинальным напряжением 12–60 В — испытательное напряжение 500 В.

Минимальный внутренний радиус изгиба серийно выпускаемых тэнов равен двум диаметрам оболочки. В отдельных случаях возможно изготовление тэнов с меньшим внутренним радиусом изгиба (по согласованию изготовителя с потребителем). По особым заказам изготавливают тэны практически с нулевым внутренним радиусом изгиба. Обязательным требованием при изготовлении изогнутого тэна должно быть условие, при котором конец контактного стержня в заделке должен быть расположен на прямом участке на расстоянии не менее 10 мм от начала изгиба. Несоблюдение этого условия может привести к браку



Р и с. 6. Сечение оболочек тэнов с плоской поверхностью:

а — треугольное; *б* — овальное (*1* — оболочка; *2* — электроизоляционный наполнитель; *3* — спираль)

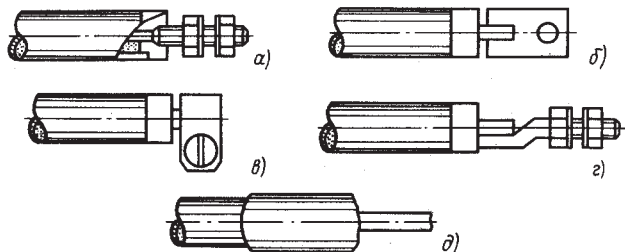
при изготовлении тэнов или к выходу из строя при эксплуатации из-за осевого смещения конца контактного стержня при изгибе.

Помимо тэнов круглого сечения в ряде контрукций бытовых электронагревательных приборов находят применение нагреватели треугольного, овального и других сечений. На рис. 6 изображены сечения тэнов, отличные от традиционных круглых сечений нагревателей.

Контактные стержни изготавливают, как правило, с резьбой, нарезаемой на выступающей из наполнителя части. В последнее время все большее распространение находят тэны, у которых к контактным стержням приварены пластины с отверстием (флажки). Подключение к пластине электрического кабеля или провода позволяет получить более надежный электрический контакт.

Имеются тэны, у которых часть усиленного вывода с резьбой приварена к выступающему из наполнителя контактному стержню. По специальному заказу изготавливают тэны с другими конструктивными решениями контактных стержней (рис. 7).

В ряде ответственных случаев применяют металлокерамический узел герметизации тэнов, который обеспечивает практически абсолютную герметичность (рис. 8). Изображенный на рис. 8, *б* герметический ввод предназначен для герметизации тэнов специального назначения с рабочим напряжением до 450 В и током до 25 А. Согласно техническим условиям (ТУ 5.635-5156-80) герметический ввод должен быть вакуумплотным (скорость натекания не должна превышать $133 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$). Электрическое сопротивление изоляции ввода не должно быть менее 10^8 Ом в процессе эксплуатации в следующих условиях: при циклических изменениях температур от 20 до 400°C ; при работе в среде с



Р и с. 7. Конструкции выводов тэнов:

а — с приваренной резьбовой частью; *б* — с приваренной пластиной; *в* — с приваренной пластиной, имеющей резьбовое отверстие для винта; *г* — с резьбовой частью, приваренной внахлест к контактному стержню; *д* — с гибким выводом

Рис. 8. Металлокерамические узлы для герметизации тэнов с диаметрами контактного стержня:

а — до 4 мм; б — до 1,8 мм

относительной влажностью $95 \pm 3 \%$; после транспортирования и хранения при температурах от -50 до $+65^\circ \text{C}$.

Влагопоглощение керамики не должно превышать $0,02\%$. Средний ресурс герметического ввода должен быть не менее 100 000 ч, средний срок службы — не менее 25 лет при коэффициенте технического использования, равном 0,5.

Выпускаемые тэны в ряде случаев имеют крепежные устройства в виде штуцеров, фланцев и других, которые соединены с оболочкой тэна при помощи пайки, сварки или опрессовки; выпускаются нагреватели, оснащенные алюминиевыми штуцерами, устанавливаемыми методом литья под давлением. Тэны, не имеющие крепежных устройств, при необходимости монтируют в установку с помощью типовых уплотняющих конструкций (рис. 9).

Для нагрева газовых сред широкое применение находят тэны с разветвленной наружной поверхностью (оребранные), позволяющие существенно увеличить теплоотдачу нагревателей, за счет чего снижаются габаритные размеры, масса нагревательного устройства и температура нагревателя. Конструкция оребрения в зависимости от назначения и технологии изготовления нагревателя имеет следующие разновидности:

оребрание в виде стальной спиралеобразной ленты или алюминиевого спиралеобразного ребра, получаемого методом накатки ролик

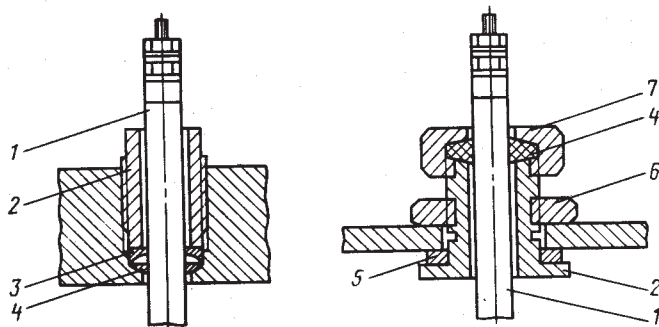
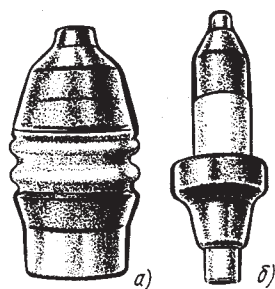
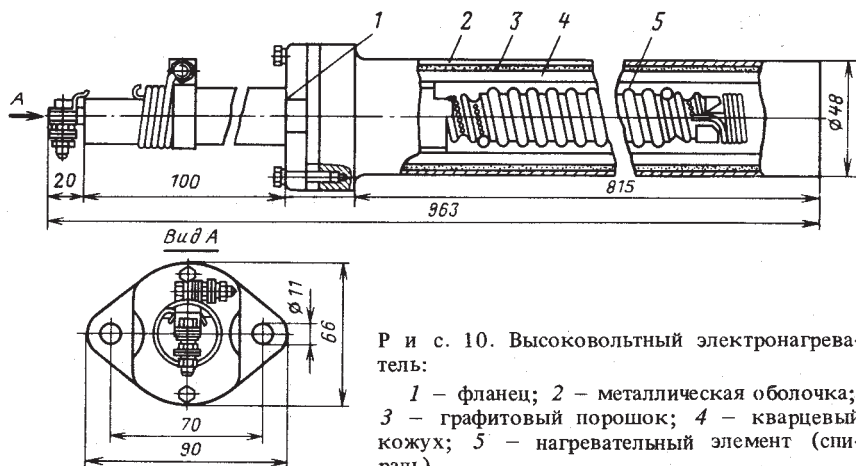


Рис. 9. Уплотнительные устройства:

1 — тэн; 2 — втулка; 3 — кольцо; 4 — сальник; 5 — прокладка; 6 — гайка; 7 — гайка нажимная



Р и с. 10. Высоковольтный электронагреватель:

1 — фланец; 2 — металлическая оболочка; 3 — графитовый порошок; 4 — кварцевый кожух; 5 — нагревательный элемент (спираль)

по алюминиевым трубам, надеваемым на оболочку тэнов (высота ребра от 30 до 42 мм, толщина 0,75 мм, шаг 3,4 мм). Такое оребрение применяется для нагрева газовой среды, при ее принудительном перемещении (см. рис. 4, в);

оребрение в виде параллельных пластин с отверстиями, насаживаемых на один или несколько поперечно расположенных тэнов;

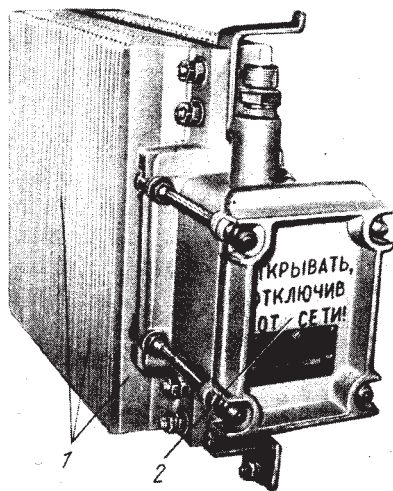
оребрение, получаемое методом алюминиевого литья под давлением, в виде поперечно расположенных параллельных ребер на одном или нескольких тэнах (см. рис. 4, г).

Для эксплуатации в установках с рабочим напряжением сети 3000–4000 В (например, на железнодорожном транспорте) применяют специальные высоковольтные тэны с усиленным изоляционным слоем между нагревательной спиралью и оболочкой. Усиление изоляционного слоя достигается различными способами, в частности за счет увеличения его толщины до 7–10 мм (вместо 1–3 мм в тэнах общепромышленного назначения); при этом тэны изготавливаются на рабочее напряжение 500 В и соединяются последовательно. Другим примером нагревателя с усиленным изоляционным слоем является конструкция, у которой между нагревательной спиралью и металлической оболочкой установлена электроизоляция из кварцевой трубы (рис. 10).

Для нагрева взрывоопасных воздушных сред применяются трубчатые электронагреватели, имеющие ряд конструктивных особенностей, направленных на устранение возможности электрического пробоя внутри тэна и прожога оболочки. Это достигается за счет увеличения толщины изоляционного слоя наполнителя, применения более качественного материала, более совершенной технологии, контроля качества и других мероприятий. Кроме того, для взрывозащищенных установок, у которых допускается возможность появления взрывоопасной сре-

Р и с. 11. Оребренный трубчатый электронагреватель:

1 — ребра из алюминиевого сплава;
2 — коробка выводов во взрывозащищенном исполнении



ды, можно применять тэны обычного исполнения с взрывозащищенной коробкой выводов (рис. 11). Существуют тэны и других конструкций, имеющих ограниченное применение.

Нагревательные кабели. Конструктивные параметры нагревательных кабелей, изготавливаемых согласно техническим условиям ТУ 16-505, 564-75, приведены в табл. 2. Предельные отклонения приведенных в таблице диаметров кабелей составляют $\pm 0,05$ мм, толщин оболочек — в интервале от плюс 0,07 до минус 0,05 мм. Длина кабелей может быть в интервале от десятков до сотен метров.

Нагревательные кабели предназначены для работы при напряжении постоянного или переменного тока (частотой до 1000 Гц), не превышающем 500 В при диаметре кабелей от 3 до 6 мм и не превышающем 115 В при меньших диаметрах. Кабели могут быть использованы при температурах от -60 до $+600^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха до 100 %. Электрическое сопротивление изоляции между жилой и оболочкой, пересчитанное на 1 м длины, должно быть в нормальных климатических условиях по ГОСТ 16962-71 не менее 10^{11} Ом, при температуре 600°C — не менее 10^5 Ом.

Кабели в нормальных климатических условиях должны выдерживать испытания напряжением переменного тока частотой 50 Гц в течение 1 мин между жилой и оболочкой, равным 1000 В для диаметров от 3 до 6 мм и 600 В при меньших диаметрах. При испытаниях, хранении и эксплуатации концы кабеля герметизируют, чтобы исключить попадание влаги внутрь кабеля.

Экспериментально установлено, что за 30 ч пребывания негерметизированного кабеля с минеральной изоляцией в среде с относительной влажностью $95 \pm 3\%$ влага проникает на 40–60 мм. В помещенный в воду отрезок кабеля за 6 месяцев влага проникла на глубину не более 200 мм [2]. Однако даже незначительное увлажнение концов кабеля приводит к резкому снижению сопротивления изоляции (на несколько порядков) и может привести к выходу из строя всего кабеля.

Таблица 2. Конструктивные параметры отечественных нагревательных кабелей с минеральной изоляцией в оболочке из стали 12Х18Н10Т

Марка кабеля, материал жилы	Число и но- минальное сечение жил, 10 ⁻⁶ м ²	Размеры, 10 ⁻³ м			Расчетное электрическое сопротивле- ние жилы при 20 °С, Ом · м ⁻¹	
		Диаметр жилы		Толщи- на обо- лочка		
		номи- нальный	предельное отклоне- ние			
КНМСС, нержавею- щая сталь	1 × 0,070	0,30	± 0,05	0,25	1,5	13,5
	1 × 0,159	0,45		0,20	2,0	6,2
	1 × 0,283	0,60		0,35	3,0	3,0
	1 × 0,502	0,80	± 0,12	0,55	4,0	1,0
	1 × 0,785	1,60	± 0,15	0,65	5,0	0,9
	1 × 1,131	1,20	± 0,18	0,75	6,0	0,7
КНМСН, никель	1 × 0,070	0,30		0,25	1,5	1,50
	1 × 0,159	0,45	± 0,05	0,20	2,0	0,70
	1 × 0,283	0,60		0,35	3,0	0,50
	1 × 0,502	0,80	± 0,12	0,55	4,0	0,30
КНМСН, никель	1 × 0,785	1,00	± 0,15	0,65	5,0	0,20
	1 × 1,131	1,20	± 0,18	0,75	6,0	0,15
	4 × 0,708	0,95	± 0,14	0,60	6,0	0,20
	2 × 0,636	0,90		0,62	5,0	0,25
КНМСНХ нихром	1 × 0,070	0,30		0,25	1,5	21,0
	1 × 0,159	0,45	± 0,05	0,20	2,0	9,2
	1 × 0,283	0,60		0,35	3,0	4,5
	1 × 0,502	0,80	± 0,12	0,55	4,0	2,5
	1 × 0,785	1,00	± 0,15	0,65	5,0	1,5
	1 × 1,131	1,20	± 0,18	0,75	6,0	1,0

Кабели должны выдерживать не менее двух циклов изгиба на цилиндр диаметром, равным десятикратному диаметру кабеля. Кабели диаметром 1,5 и 2,0 мм должны выдерживать навивание на цилиндр диаметром 2,0 и 6,0 мм соответственно. Нарботка кабелей в режимах и условиях, установленных техническими условиями, должна быть не менее 15 000 ч; срок сохранения при хранении в отапливаемых хранилищах в упаковке поставщика и смонтированных в аппаратуру, а также в комплекте запасных частей 12 лет при условии защиты кабелей от воздействия атмосферных осадков и агрессивных сред. Срок службы, в пределах которого обеспечиваются указанные наработка и сохраняемость, должен составлять 12 лет. Однако нормальная эксплуатация кабеля обеспечивается лишь в том случае, когда все концевые и переходные соединения не имеют нарушенной герметизации. Выбор необходимого кабеля зависит от требуемой температуры и среды.

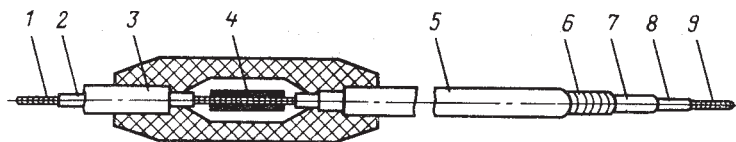


Рис. 12. Конструкция нагревательного кабеля ЭНГК:

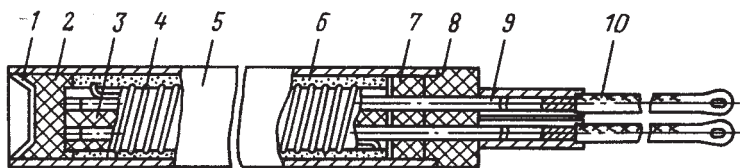
1 — медная жила; 2 — оболочка; 3 — вывод; 4 — соединение горячей и холодной жилы; 5 — наружная оболочка активной части; 6 — металлический экран; 7 — внутренняя оболочка; 8 — изоляционная оболочка; 9 — нагревательная жила

По специальному заказу могут быть изготовлены кабели, предназначенные для эксплуатации в диапазоне температур от -60 до $+800$ °С при рабочем напряжении до 115 В постоянного или переменного тока частотой до 5000 Гц, а также кабели, предназначенные для эксплуатации при рабочем напряжении до 40 В постоянного или переменного тока частотой до 1000 Гц в диапазоне температур от -60 до $+900$ °С.

Несколькими организациями проводятся исследования по применению кабелей для подогрева инженерных коммуникаций в условиях низких температур. СКБ "Транснефтеавтоматика" разработаны два типа нагревательных кабелей ЭНГК (элемент нагревательный гибкий кабельный), которые различаются по температуре эксплуатации: ЭНГК-85 применяется для эксплуатации при температуре до 85 °С, ЭНГК-180 — для эксплуатации при 180 °С [1]. Кабель ЭНГК состоит из трех частей: активной (греющей) части, коммутационных соединений и низкотемпературных выводов (рис. 12).

Активная часть представляет собой одно- или многопроволочную жилу с наложенными на нее изоляционными слоями. Непосредственно на жиле находится слой кремнийорганической резины, затем слой оплетки из стеклоткани, поверх которой нанесена оболочка из поливинилхлорида, затем экранирующая оплетка из медных проволок и защитная оболочка из пластика. Активная часть кабеля соединяется с выводами с помощью опрессовки, пайки или сварки с последующей изоляцией теплостойкой изоляционной лентой. Места соединения защищаются снаружи герметичной пластиковой опрессовкой или стальной муфтой с сальниковыми уплотнениями или герметизирующим компаундом.

Основными техническими характеристиками кабелей ЭНГК являются рабочее напряжение, равное 220 В (по требованию заказчика кабели могут быть изготовлены на другое напряжение, но не выше 380 В), и удельная мощность, т.е. мощность, приходящаяся на 1 м активной длины кабеля. Диапазон удельных мощностей кабелей ЭНГК-85 находится в пределах от 10 до 45 Вт · м⁻¹, длина может быть от 25 до 140 м. Кабели ЭНГК-180 могут иметь длину от 26 до 56 м с удельной мощностью от 30 до 70 Вт · м⁻¹. Технические характеристики кабелей ЭНГК



Р и с. 13. Электронагреватель патронного типа:

1 — доньшко; 2 — шайба нижняя; 3 — керамический сердечник; 4 — спираль нагревательная; 5 — оболочка; 6 — периклаз; 7 — шайба верхняя; 8 — изолятор; 9 — стержень контактный; 10 — вывод гибкий

отражаются в условном обозначении, включающем марку, число нагревательных жил, мощность, рабочее напряжение, исполнение по разделке концевых частей, длину активной части. Варианты исполнения по разделке концевых частей нагревательного кабеля маркируются двумя буквами, при этом первая буква обозначает вид разделки с одного конца кабеля, а вторая — вид разделки с другого конца: Н — наколечник, М — муфта, С — опрессовка, К — коробка, Г — глухая разделка.

Патронные тэны. Конструктивно патронные тэны представляют собой металлический корпус (трубу), внутри которого расположен нагревательный элемент из проволоки высокого сопротивления, намотанной в виде спирали на керамический сердечник, изолированный от корпуса электротехническим периклазом (рис. 13). Оба контактных вывода расположены с одной стороны патронного нагревателя, а на другой стороне торец трубки нагревателя имеет герметично заваренное металлическое доньшко. Узел герметизации нагревателя имеет два исполнения. Для нагревателей, не оснащенных со стороны выводов специальной арматурой, в качестве герметиков применяется относительно слабо влагозащищающая заделка (керамическая замазка или слюдяные шайбы). Это вызвано наличием значительной температуры в зоне выводов (200—400 °С и более) и отсутствием надежных герметиков, работающих при таких температурах. Такие нагреватели необходимо хранить в среде с относительной влажностью не более 70 % или перед эксплуатацией подвергать сушке при температуре 120 °С в течение 3—4 ч. При втором конструктивном исполнении узла герметизации температура в его зоне не превышает 200 °С. Это достигается удлинением нагревателя и удалением узла герметизации от нагревательной спирали. Герметизация патронных тэнов осуществляется с помощью тех же материалов, какие используются для двухконцевых нагревателей.

Выпуск патронных нагревателей начал отечественной промышленностью (Фастовский ЗЭТО) в 1984 г., и их номенклатура в настоящее время относительно невелика. Нагреватели предназначены для нагрева пресс-форм и используются в качестве комплектующих изделий в промышленных установках; их номинальное напряжение 220 В; мак-

симальная рабочая температура на поверхности активной части оболочки нагревателя 500 °С.

Основные геометрические и электротехнические параметры патронных тэнов приведены в табл. 3. Конструктивное исполнение выводной части патронных нагревателей предусматривает гибкие и жесткие изолированные и неизолированные выводы. Основные исполнения концевых частей и крепежной арматуры приведены на рис. 14, 15. В отличие от двухконцевых тэнов патронные нагреватели выпускаются только в прямом виде. Оболочка патронного тэна выполнена, как правило, из нержавеющей трубы с шлифованной поверхностью, обеспечивающей очень плотную посадку трубчатого нагревателя в отверстие нагреваемого тела с зазором по диаметру не более 0,02 мм.

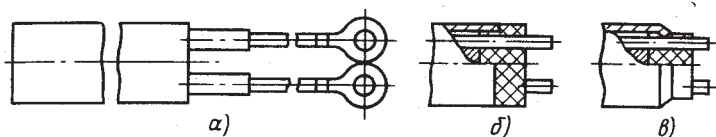
По особому заказу патронные тэны изготавливаются с встроенным термоэлектрическим преобразователем, который предназначен для непрерывного или периодического измерения температуры в рабочей части нагревателя.

Т а б л и ц а 3. Основные геометрические и электротехнические параметры патронных тэнов

Номинальная мощность, кВт	Удельная поверхностная мощность, $10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	Размеры, 10^{-3} м		
		Диаметр	Длина оболочки	
			полная	активная часть
0,2	37,7	6,5	40	26
0,315	33,5		60	46
	27,9	8		45
0,25	9,1	10	125	110
	36,2		40	22
0,125	9,5		60	42
0,16	8,2		80	62
0,5	19,4	12,5	100	82
0,315	9,4		125	107
0,25	10,6		80	60
0,5	12,1		125	105
	9,1		160	140
0,63	8,9		200	180

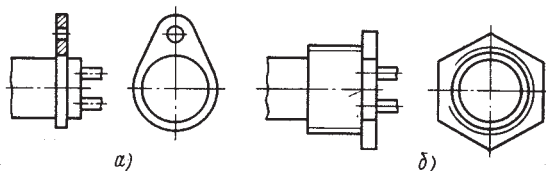
Табл. 3 (продолжение)

Номинальная мощность кВт	Удельная поверхностная мощность, $10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	Размеры, 10^{-3} м		
		Диаметр	Длина оболочки	
			полная	активная часть
0,2	7,8	14		
0,315	12,35		80	58
0,63	24,7			
0,315	9,2		100	78
0,8	8,0		250	228
0,4	10,7		100	75
0,5	10		125	100
0,63	9,3		160	135
1,0	14,8		160	135
0,4	4,6			
0,8	9,2	16	200	175
1,25	14,3			
0,5	4,4			
1,0	8,8		250	225
1,25	11,1			
0,63	4,6			
1,0	7,3			
1,25	9,1		300	275
1,6	11,6			
0,8	4,3		400	375
0,5	6	20	160	132
	7,4		200	172
0,8	5,7		250	222
1,25	7,3		300	272



Р и с. 14. Конструктивные исполнения концевых частей патронных тэнов:

а — без торцевого изолятора; *б* — с торцевым изолятором; *в* — с торцевым изолятором и завальцованной оболочкой



Р и с. 15. Патронные тэны с крепежной арматурой в виде:

а — планки; *б* — штуцера

Плоские тэны. Конструктивно плоский тэн состоит из металлической оболочки овального сечения, получаемой частичным плющением трубы, и заключенных в ней плоских керамических сердечников с отверстиями, в которых расположены спирали из проволоки высокого сопротивления. Зазоры между проволокой, сердечниками и оболочкой заполнены электротехническим периклазом (рис. 16).

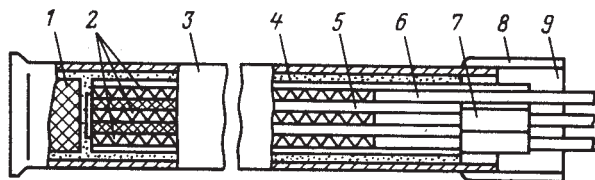
Торцевые изоляторы плоских тэнов выполнены из тонкостенных слюдяных трубок. В отличие от двухконцевых тэнов спираль плоских нагревателей соединяется с гибким металлическим выводом.

Производство плоских тэнов, так же как и патронных, впервые освоено на Фастовском ЗЭТО в 1984 г. Эти нагреватели могут иметь следующее исполнение:

поперечное сечение $6 \times 17 \text{ мм}^2$;

длина от 0,6 до 2,0 Ом;

удельная поверхностная мощность $(1,0-2,08) \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;



Р и с. 16. Электродвигатель плоского типа:

1 — пятка керамическая; *2* — спираль нагревательная; *3* — оболочка; *4* — периклаз; *5* — сердечник керамический; *6* — вывод гибкий; *7* — втулки слюдяные; *8* — втулка крепежная; *9* — герметик

номинальная мощность от 0,4 до 1,6 кВт;
рабочее напряжение 220 Вт;
конфигурация — с одним и более гибом как по широкой, так и по узкой стороне сечения: радиусгиба по широкой стороне не менее 20 мм, по узкой стороне не менее 10 мм;
количество нагревательных спиралей — две и три параллельно расположенные спирали;
расположение выводов — с одной или с обеих сторон нагревателя.

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЭНОВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

Основными материалами для изготовления двухконцевых круглых тэнов являются:

- электротехнический периклаз (электроизоляционный наполнитель тэнов);
- проволока из сплава высокого сопротивления (нагревательный элемент);
- тонкостенные металлические трубы (оболочка);
- калиброванная стальная проволока для контактных стержней;
- герметизирующие материалы (для герметизации торцов тэнов);
- изоляторы для оснащения торцов тэнов.

В зависимости от конструкции и назначения тэнов для их изготовления применяются и другие материалы и комплектующие изделия: гайки и шайбы для резьбовых контактных стержней; листовая сталь для контактных соединений в виде флажка; алюминиевый прокат для оребрения тэнов методом выдавливания; алюминиевые трубы и чушки для изготовления оребрения и литых крепежных штуцеров методом литья под давлением; листовая и круглая сталь для изготовления крепежных штуцеров и фланцев и др.

Для изготовления нагревателей патронного типа и плоских нагревателей помимо указанных материалов применяются:

- специальные изоляционные керамические детали из стеатита или на основе окиси магния (стержни, верхние и нижние шайбы, звездочки), являющиеся в сочетании с электротехническим периклазом электроизоляционным наполнителем тэнов;

- калиброванная никелевая проволока диаметром 0,5—2 мм для внутренних контактных стержней патронных тэнов;

- многожильная гибкая никелевая, латунная или нихромовая проволока для контактных выводов плоских тэнов;

- слюдяные гладкие изоляторы выводов плоских тэнов в виде трубок из шипаной природной слюды;

- электротехнический периклаз с фракцией наиболее крупных зерен не более 0,25 мм;

гибкие изолированные высокотемпературные провода для наружной части токовых выводов тэнов.

Для производства нагревательных кабелей помимо некоторых вышеуказанных материалов находят применение жженая магнезия (по ГОСТ 844-79), никель и нержавеющая сталь.

Ниже приведены характеристики и требования к некоторым материалам, наиболее существенно влияющим на качество и технический уровень тэнов и кабелей.

Электротехнический периклаз. К электроизоляционному наполнителю тэнов и нагревательных кабелей предъявляются следующие требования:

- низкая удельная электрическая проводимость при температурах до $1000-1100^{\circ}\text{C}$;

- высокая электрическая прочность;

- химическая нейтральность к материалу спирали сопротивления (или металлической жилы) и оболочки;

- достаточно высокий коэффициент теплопроводности;

- постоянство электро- и теплотехнических свойств в процессе длительной (десятки тысяч часов) эксплуатации нагревателей;;

- низкая влагопоглощаемость;

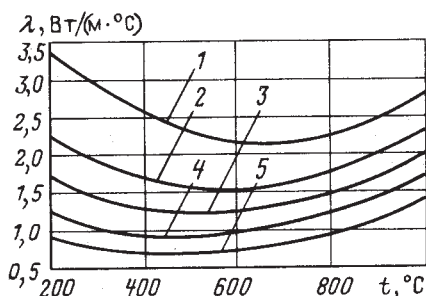
- достаточная сыпучесть.

Как следует из литературных данных, результатов испытаний материалов и опыта изготовления тэнов на отечественных заводах и за рубежом, лучшим электроизоляционным наполнителем, наиболее полно отвечающим вышеперечисленным требованиям и нашедшим основное применение в промышленном производстве тэнов, является периклаз.

В отдельных случаях применяются электрокорунд, кварцевый песок, оксид бериллия, диоксид циркония и ряд других материалов.

Периклаз — плавеный оксид магния — получают в дуговых электрических печах плавкой магнийсодержащего сырья. Сырьем служат природные минералы — магнезит и брусит, а также жженая магнезия. Магнезит (карбонат магния MgCO_3) содержит по массе до 48 % MgO , брусит (гидроокись магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$) — до 66 % MgO . Средний расход электроэнергии около 6 МВт · ч на 1 т продукта. Время плавки моноблока массой 15–20 т, из которого получают 6–8 т готового продукта, 42–48 ч, время остывания 120–200 ч.

Периклаз не подвержен кристаллическим превращениям и существует только в одной модификации. Он имеет кристаллическую решетку типа каменной соли. Плотность периклаза $3580 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, твердость по минералогической шкале 6, температура плавления около 2800°C [3]. Средняя удельная теплоемкость оксида магния в зависимости от температуры возрастает от $976 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ при температуре 100°C до $1182 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ при температуре 1100°C .



Р и с. 17. Зависимость коэффициента теплопроводности периклаза от температуры при различных значениях пористости, % (плотности, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$):

1 — 10,6 (3200); 2 — 16 (3000);
3 — 21,2 (2800); 4 — 30 (2500);
5 — 40 (2150)

Коэффициент линейного расширения периклаза $\alpha_{\text{п}}$ в интервале от 25 до 1200 °C изменяется следующим образом:

Температура, °C	300	600	900	1200
$\alpha_{\text{п}} \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	13,3	13,5	13,9	15,0

В интервале температур от −196 до +1200 °C монокристаллы периклаза обладают упругой деформацией, значение которой колеблется от 4 до 16 % [3].

Коэффициент теплопроводности спрессованного периклаза λ зависит в основном от его пористости и температуры [4]. Эта зависимость графически представлена на рис. 17 или может быть описана выражением

$$\lambda = \frac{11,6}{\Pi^{0,725}} \left[1 + 2,5 \cdot 10^{-6} \left(t - \frac{1260}{\Pi^{0,279}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где $\Pi = (1 - \gamma_{\text{п}} \gamma_0^{-1}) \cdot 100$ — общая пористость периклаза, %; $\gamma_{\text{п}}$ — плотность спрессованного периклаза, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; γ_0 — плотность периклаза с нулевой пористостью, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; t — средняя температура периклаза в тэне, °C:

$$t = (t_{\text{сп}} + t_{\text{т}})/2,$$

здесь $t_{\text{сп}}$, $t_{\text{т}}$ — температура спирали и оболочки тэна соответственно, °C.

Согласно ГОСТ 13236-83 "Порошки периклазовые электротехнические" электротехнический периклаз по качеству должен соответствовать высшему, а также I—III классам.

В зависимости от класса свойства периклаза нормируют по химическому составу (табл. 4) и электротехническим характеристикам: удельному объемному сопротивлению и электрической прочности (табл. 5).

Ведущие зарубежные фирмы, изготавливающие электротехнический периклаз для тэнов, проводят обязательную проверку его электроизоляционных свойств на токи утечки. Проверка осуществляется на эталонных образцах тэнов при температуре на оболочке 600—900 °C. Та-

Т а б л и ц а 4. Химический состав электротехнического периклаза

Наименование показателя	Содержание компонентов, %, по массе для периклаза классов			
	высшего	I	II	III
Массовая доля оксида магния, % не менее	97,0	96,0	95,5	95,0
Массовая доля диоксида кремния, % не более	1,5	2,0	2,5	2,8
Массовая доля оксида алюминия, % не более	0,8	1,0	1,5	2,0
Массовая доля суммы примесей, %, не более	0,9	1,6	2,2	3,0
в том числе:				
массовая доля оксида кальция, %, не более	0,7	1,3	1,8	2,5
массовая доля оксида железа, %, не более	0,08	0,12	0,20	0,34
Изменение массы при прокаливании, %, не более	0,1	0,1	0,1	0,2
Магнитные включения, %, не более	0,005	0,007	0,010	0,020
Влагопоглощение, %, не более			2,5	

П р и м е ч а н и е. Массовые доли оксидов, магния, кремния, алюминия приведены с учетом содержания легирующих добавок — соединений оксидов магния, кремния, алюминия и др.

кая проверка наиболее полно и стабильно характеризует электроизоляционные свойства наполнителя тэнов, в то время как проверка его по удельному объемному сопротивлению отличается большей несходимостью для одних и тех же партий периклаза. В связи с этим решается вопрос о введении проверки на токи утечки отечественного периклаза, что позволит значительно повысить надежность тэнов.

По зерновому составу электротехнический периклаз делят на крупнозернистый и мелкозернистый (табл. 6).

Для сравнения в табл. 7 приведен химический состав электротехнического периклаза, выпускаемого рядом зарубежных фирм.

В специальных случаях при необходимости прогнозирования электроизоляционных свойств периклаза зависимость удельного объемного сопротивления спрессованного периклаза без легирующих добавок от его химического состава может быть выражена приближенной эмпирической формулой [5]

$$\lg \rho_3 = -10,8 + 0,165 C_{\text{MgO}} + 0,06 C_{\text{CaO}} - 2,65 C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}, \quad (2)$$

где $\lg \rho_3$ — логарифм удельного объемного сопротивления периклаза при температуре $t_3 = 1000^\circ\text{C}$, Ом · м; C_{MgO} , C_{CaO} , $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ — содержание в периклазе соответственно оксидов магния, кальция и железа, %.

Т а б л и ц а 5. Электротехнические параметры периклаза

Показатель	Норма для периклаза классов			
	высшего	I	II	III
Удельное объемное сопротивление, $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, при температуре 800°C не менее	5	3	2	0,2
Удельное объемное сопротивление, $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, при температуре 1000°C не менее	2,5	2	0,7	0,2
Электрическая прочность мВ/м, при температуре 1000°C не менее	1,3	1,2	1,1	1,0

Подставив в формулу (2) данные конкретного химического анализа можно рассчитать ожидаемое удельное объемное сопротивление периклаза и решить вопрос о применимости его в тэзах с требуемыми техническими параметрами.

Удельное объемное сопротивление периклаза при температурах, отличающихся от 1000°C , определяют с помощью графической зависимости, приведенной на рис. 18. Для требуемой температуры t , зная химический состав, удельное объемное сопротивление ρ вычисляют следующим образом: находят эквивалентные сопротивления периклаза по формуле (2); вычисляют отношение t/t_3 по графику (рис. 18), рассчитывают $\lg(\rho_3/\rho) \cdot 10^6$, а затем ожидаемое удельное объемное сопротивление ρ .

Например, требуется определить ожидаемое удельное объемное сопротивление периклаза при температуре 800°C , имеющего следующий химический состав: 96,94 % MgO ; 1,7 % CaO ; 0,18 % Fe_2O_3 ; 0,38 % Al_2O_3 ; 0,80 % SiO_2 .

Т а б л и ц а 6. Зерновой состав электротехнического периклаза

Размер частиц, мм	Норма для зернового состава порошка, % по массе	
	крупнозернистого	мелкозернистого
Более 0,063	Не допускается	
Более 0,5	Не более 2	Не допускается
От 0,5 до 0,4	5—20	Не допускается
От 0,4 до 0,25	Не менее 30	Не менее 36
От 0,25 до 0,16	Не менее 30	Не более 25
От 0,16 до 0,063	Не более 8	Не менее 20
От 0,063 до 0,04	Не более 4	Не более 10
Менее 0,04		Не более 3

После подстановки в формулу (2) содержания в периклазе компонентов MgO , CaO и Fe_2O_3 , %, получим

$$\lg \rho_3 = -10,8 + 0,165 \cdot 96,94 + \\ + 0,06 \cdot 1,7 - 2,65 \cdot 0,18 = 4,82.$$

Так как $t/t_3 = 800/1000 = 0,8$, то для $t/t_3 = 0,8$ согласно рис. 18

$$\lg \frac{\rho_3}{\rho} \cdot 10^6 = 4,75.$$

Следовательно, $\lg \rho = \lg \rho_3 + \lg 10^6 - 4,75 = 6,07$ и $\rho = 1,2 \cdot 10^6$ Ом · м.

Проволока из сплавов высокого сопротивления. Применяемая для изготовления спиралей тэнов проволока должна иметь достаточно высокое удельное электрическое сопротивление, обеспечивать работоспособность нагревателей в период предусмотренного документацией на тэн технического ресурса, сохранять в требуемых пределах электрические параметры тэнов и быть химически нейтральной к наполнителю.

Наиболее полно удовлетворяет этим требованиям нихромовая проволока из сплавов марок Х15Н60-Н и Х20Н80-Н. Во ВНИИЭТО проводятся исследования, направленные на применение в тэнах сплавов высокого сопротивления с меньшим содержанием никеля (ХН20ЮС) и безникелевых (Х23Ю5Т и Х27Ю5Т).

Химический состав, физические, электрические и механические свойства выпускаемых сплавов сопротивления приведены в табл. 8, 9. Максимальные рекомендуемые рабочие температуры нагревательных элементов, работающих на воздухе, даны в табл. 10.

При конструировании тэнов значения максимальной рабочей температуры проволоки должны выбираться в зависимости от назначения и требуемого срока службы тэнов.

Поправочные коэффициенты для расчета изменения электрического сопротивления сплавов Х15Н60-Н, Х20Н80-Н, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т в зависимости от температуры приведены в ГОСТ 12766.1-77; для сплава ХН20ЮС: 1,00; 1,07; 1,14; 1,21; 1,25; 1,29; соответственно при температуре нагрева, °С: 20; 200; 400; 600; 800; 1000.

Как видно из таблиц, железохромалюминиевые сплавы имеют в среднем в 1,25 раза более высокое значение удельного сопротивления. Это позволяет при проектировании тэнов с расчетным диаметром проволоки спирали менее 0,3 мм увеличить диаметр, что повышает технологичность изготовления тэнов и их надежность в эксплуатации.

Однако наряду с указанными достоинствами безникелевые сплавы обладают рядом существенных недостатков, основными из которых являются более низкая стойкость, чем у хромоникелевых сплавов при высоких температурах, и значительно более ускоренное изменение первоначального электрического сопротивления (старение).

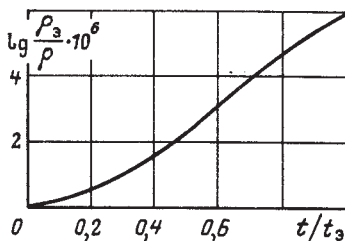


Рис. 18. Зависимость $\rho_3/\rho = f(t/t_3)$

Т а б л и ц а 7. Химический состав некоторых марок электротехнического перикла-

Наименование показателя	Содержание компонентов, % по					
	Norton (США)		General electric (США)	Sofrem (Франция)		
	Марка			Марка		
	Магно- райт 70	Магно- райт L		Марка 12701	HA	H
Массовая доля оксида магния, %	93,40	95,92	Остальное	95—97	94—96	94—96
Массовая доля диоксида кремния, %	3,70	0,90	3,0—4,0	2—3	2—4	2—4
Массовая доля оксида алюминия, %	0,16	—	—	—	—	—
Массовая доля оксида кальция, %	1,30	1,18	1,3—1,7	1—1,7	1,2—1,7	1,2—1,8
Массовая доля оксида железа, %	0,13	0,18	0,05—0,08	Менее 0,10	Менее 0,15	Менее 0,15

Токопроводящие жилы нагревательных кабелей помимо сплава сопротивления марки Х20Н80-Н изготавливают из стали 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т (ГОСТ 18143-72) и никеля марок НП2, НП3 и НП4 (ГОСТ 2179-75). Выбор материала жилы кабеля определяется исходя из требований по электрическому сопротивлению и рабочей температуре кабеля.

Тонкостенные металлические трубы для оболочки тэнов. Выбор материала оболочки тэнов зависит от характера нагреваемой среды и

Т а б л и ц а 8. Химический состав сплавов сопротивления

Марка сплава	Химический				
	Углерод, не более	Кремний	Марганец	Сера	Фосфор
Х23Ю5	0,05	Не более 0,6	0,3	0,015	0,02
Х27Ю5Т	0,05	Не более 0,6	0,3	0,015	0,02
Х15Н60-Н	0,06	1,0–1,5	0,6	0,015	0,02
Х20Н80-Н	0,06	1,0–1,5	0,6	0,015	0,020
ХН20ЮС	0,12	2,0–2,7	0,85	0,02	0,02

за, выпускаемого зарубежными фирмами

массе, для периклаза различных фирм, марок

Dynamit Nobel (ФРГ)	Tateho Chemical (Япония)		TSL (Англия)		
Марка Дина- терм	Марка		Марка		
	КМАО	КМАО-Н	Меглокс IGN	Меглокс 1/T	Меглокс 2/T
96–98	Не менее 98,5	Не менее 99,2	95–96,8	94,5–96,3	94–96,3
1,5–2,5	0,40	0,15	2,27–2,75	2,64–4,0	2,64–4,5
—	0,20	0,20	—	—	—
0,7–1,0	0,75	0,40	0,8–1,5	1,10–1,5	1,35–1,5
Менее 0,1	0,14	0,09	0,10–0,15	0,12–0,15	0,12–0,16

рабочей температуры нагревателя. Максимально допустимые температуры для основных материалов оболочек тэнов, эксплуатируемых в воздушной среде, составляют, °С:

Медь, латунь	250
Алюминиевый сплав	350
Сталь углеродистая	450
Сталь нержавеющая (12Х18Н10Т)	750

состав, %

Хром	Никель	Титан	Алюминий	Железо
21,5–23,5	Не более 0,6	Не более 0,4	4,6–5,3	Остальное
26,0–28,0	Не более 0,6	0,15–0,40	5,0–5,8	„
15,0–61,0	55,0–61,0	Не более 0,2	Не более 0,2	„
20,0–23,0	Основа	Не более 0,2	Не более 0,2	Не более 0,1
19,5–21,0	19,5–21,0	—	1,0–1,5	Остальное

Таблица 9. Основные физические параметры сплавов сопротивления

Параметр	Марка сплава					
	X23Ю5Т	X23Ю5Т	X27Ю5Т	X15Н60-Н	X20Н80-Н	XН20ЮС
Плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	7210	7250	7190	8200	8400	—
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1500	1500	1510	1390	1400	—
Твердость НВ	200–250	180–250	200–250	140–150	140–150	—
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$	16,8	16,8	16,8	12,6	16,8	—
Теплопроводность $10^{-3} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$	0,462	0,462	0,462	0,462	0,504	—
Удельное электрическое сопротивление при 20°C , $\text{мкОм} \cdot \text{м}$	1,34– –1,45	1,30– –1,40	1,37– –1,47	1,07– –1,17	1,06– –1,17	$1,02 \pm$ $\pm 0,04$
Относительное удлинение, %, не менее	12	12	16	20	20	35
Предельные диаметры	0,3–7,5	0,3–7,5	0,5–5,5	0,1–7,5	0,1–7,5	0,3–7,5

Трубы из меди, латуни и алюминиевых сплавов применяют для изготовления тэнов достаточно редко. Медные, латунные оболочки, используемые в основном для нагрева водных растворов, должны, как правило, иметь защитное покрытие, так как при большом содержании в воде соединений хлора эти оболочки быстро разрушаются. Трубы из алюминиевых сплавов используют для изготовления тэнов, которые запрессовываются в пазы алюминиевых деталей, например подошвы утюгов, при этом качество уплотнения периклаза в тэнах, как правило, невысокое и отличается существенной нестабильностью. Это обстоятельство не позволяет широко использовать трубы из алюминиевых сплавов в тэнах.

Трубы из углеродистых сталей применяют для изготовления тэнов, предназначенных для нагрева воздуха и различных газов, подогрева масел, растворов в щелочных ваннах, контактного обогрева, для заливки в металлические сплавы преимущественно легких металлов и для запрессовки в пазы металлических деталей, для нагрева воды и слабощелочных водных растворов (см. табл. 1). Применение в водных растворах щелочей и кислот тэнов с защитными покрытиями (цинковыми, хромоникелевыми и др.) повышает ресурс нагревателей в несколько раз.

Тэны с оболочкой из стали марки 12Х18Н10Т используют в инфракрасных излучателях, для нагрева агрессивных сред, воздушных сред с температурой на поверхности нагревателей до 750°C , в ваннах для плавления легкоплавких металлов и т.п. В ряде случаев для нагрева специальных сред применяют тэны с оболочкой из титановых сплавов,

Т а б л и ц а 10. Рекомендуемые максимальные рабочие температуры сплавов сопротивления (при работе на воздухе)

Марка сплава	Рекомендуемая максимальная рабочая температура нагревательного элемента, °С, в зависимости от диаметра проволоки, $10^{-3} \cdot \text{м}$		
	0,2	0,4	1,0
X23Ю5	950	1025	1100
X23Ю5Т	950	1075	1225
X27Ю5Т	950	1075	1200
X15Н60-Н	900	950	1000
X20Н80-Н	950	1000	1100

а также из сплавов, обладающих более высокой коррозионно- и жаростойкостью по сравнению со сплавом 12Х18Н10Т.

За рубежом изготавливают также оболочки из жаропрочных материалов, содержащих 25% Cr, 20% Ni или 20% Cr, 30% Ni, в условиях, где рабочая температура и коррозионная среда не допускают применения труб с пониженным содержанием хрома и никеля. Это обеспечивает длительную работу тэнов при температуре до 850 °С, а также существенно увеличивает срок службы в агрессивных средах.

При производстве тэнов используются как цельнотянутые, так и электросварные трубы с толщиной стенки от 0,5 до 1,0 мм (для тэнов специального назначения толщина стенки до 1,5 мм). Качество изготовления тэнов в значительной степени определяется допусками на размер внутреннего грата (для электросварных труб), наружного диаметра, толщины стенки и эллипсности трубы, которые особенно должны быть ужесточены по мере перехода на производство тэнов малого диаметра. При изготовлении тэнов диаметром 6,5–8,5 мм предельные допуски на трубы не должны превышать: на диаметр $\pm 0,08 \text{ мм}$; на толщину стенки $\pm 0,05 \text{ мм}$.

К трубам предъявляют также высокие требования по пластичности в связи с необходимостью многократных деформаций трубы при обжате, гибке и подпрессовке тэна. Пластичность и механические свойства труб проверяют в соответствии со стандартами на трубы путем испытаний на раздачу конусом, сплющивание, изгиб, повышенное давление и др. Для обеспечения требования пластичности труб и сохранения целостности оболочки в процессе изготовления нагревателей трубы необходимо поставлять на заводы—изготовители тэнов в термообработанном состоянии.

При использовании электросварочных труб (как из углеродистой, так и из нержавеющей стали) важными факторами являются механическая прочность и герметичность сварного шва, которые должны обеспечиваться как в состоянии поставки, так и после ряда деформаций, имеющих место в процессе опрессовки и гибки тэнов, пайки или сварки

их со штуцерами, фланцами и др. Из практики крупносерийного производства тэнов известны случаи, когда на завершающих стадиях изготовления нагревателей невосстанавливаемый брак из-за появления микроили макротрещин составлял до 20–25% объема выпускаемой продукции. В связи с этим целесообразно проводить тщательный входной контроль электросварных труб по качеству сварного шва.

На качество изготовления тэнов большое влияние оказывают технология и материалы, используемые трубными заводами для консервации внутренней поверхности труб. При применении даже небольшого количества графита в технологической операции при производстве и консервации труб очистка их внутренней поверхности на заводах—изготовителях тэнов не может быть обеспечена ни одним из принятых технологических приемов (химическая очистка, ультразвуковые установки и др.). При такой консервации обеспечить требуемую для изготовления тэнов чистоту внутренней поверхности трубы можно только механическим путем (пескоструйкой, дробеструйкой), что в условиях крупносерийного производства тэнов неприемлемо из-за большой трудоемкости и низкой производительности. Консервация внутренней поверхности трубы должна быть выполнена относительно небольшим слоем (до 0,2 мм), а материал консерванта должен обеспечивать быструю и надежную очистку применяемыми в практике способами (см. прилож. 4).

Из нескольких видов защитных покрытий наружной поверхности нагревателей относительно простым и экономичным покрытием углеродистой оболочки тэнов является алитирование. Проведенные во ВНИИЭТО исследования показали, что алитирование оболочек тэнов из стали 10 позволяет повысить срок службы нагревателей, работающих на воздухе при температурах на оболочке 500–700 °С, до 10 000 ч и более (при 500 и 600 °С срок службы испытанных тэнов превышал 22 000 ч) [6]. Наиболее простым является способ алитирования, при котором предварительно обработанная поверхность тэна погружается в расплавленный алюминий. Недостаток способа — необходимость принятия специальных мер для защиты торцов тэнов от проникновения жидкого металла и его паров. Во ВНИИЭТО с привлечением специализированных организаций проводятся исследования по изысканию других технологических приемов алитирования тэнов, а также других видов покрытий. Одним из способов защиты оболочки тэнов от коррозии в агрессивных растворах является заливка нагревателей в чугунные "башмаки".

Оболочки нагревательных кабелей изготавливают, как правило, из стали марки 08Х18Н10Т или 12Х18Н10Т (ГОСТ 9941-81) и по специальным заказам из сплава ХН78Т (ЭИ435).

Калиброванная стальная проволока для выводных стержней применяется, как правило, из сталей марок Ст3, сталь 10, 12Х18Н10Т. Использование калиброванной проволоки для выводных контактных стерж-

ней позволяет получать резьбу методом накатки, что значительно снижает трудоемкость и повышает производительность труда при крупносерийном производстве тэнов.

Герметизирующие материалы. В качестве материалов для герметизации торцов тэнов применяются кремнийорганические лаки и эмали (КО-08; КО-75; КО-84; КО-916; КО-921 и др.), резиноподобные герметики (ВГО-1; виксинт У1-18 и У2-28 и др.) и эпоксидные герметики (ЭД-5; ЭД-6; К-400 и др.). В ряде случаев для герметизации используют другие материалы: пробки уплотнительные из силиконовой резины ИРП-1400, устанавливаемой в торцы тэнов до обжаривания; чехлы из литой теплоустойчивой резины, охватывающей монолитным покрытием торцы тэна с гибким токопроводящим проводом; битумная мастика, применяемая в блоках тэнов, имеющих несколько нагревателей, торцы которых свариваются в общую герметизирующую коробку.

Разновидность герметизирующих материалов определяется двумя основными условиями:

эксплуатационной температурой их применения, которая составляет не более 100 °С для битумной мастики и эпоксидных герметиков, не более 120 °С для всех лаков и эмалей, кроме КО-08 и КО-84; для этих лаков и для виксинтов температура применения может быть повышена до 150 °С (кратковременно до 200 °С);

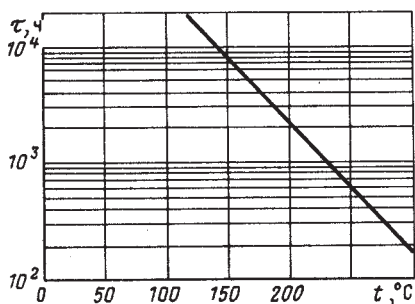
влагозащитными свойствами герметизирующих материалов, которые для всех перечисленных герметиков (кроме битумной мастики) таковы, что тэны, находящиеся в отключенном состоянии, в условиях повышенной влажности (80–98% при температуре 25–35 °С) в течение 3–6 мес, как правило, снижают сопротивление изоляции от сотен тысяч до 0,5 МОм. Тэны, загерметизированные битумной мастикой, способны сохранять высокое значение изоляции (десятки мегаомов) в течение шести и более месяцев (до 2–3 лет).

При температурах менее 100 °С и отсутствии механических воздействий на тэны эпоксидные герметики могут сохранять электроизоляционные свойства нагревателей подобно битумной мастике.

Недопустимость превышения значения температуры, указанного выше, для всех герметиков объясняется их резко выраженным старением и снижением срока службы в зависимости от температуры среды, в которой находится герметизирующий материал. На рис. 19 приведена зависимость срока службы виксинта У1-18 от рабочей температуры в зоне узла герметизации. Для кремнийорганических лаков даже кратковременное превышение температуры выше приведенных значений ведет к потере влагозащитных свойств узла герметизации тэна.

При работе тэнов в условиях холодного климата (до –60 °С) рекомендуется применять виксинт У2-28 или лак КО-08.

В целях сохранения высокого значения изоляции тэнов на период длительного хранения или пребывания в отключенном состоянии при относительной влажности 80–98% применяются следующие дополнитель-



Р и с. 19. Зависимость срока службы τ вискиснта У1-18 от рабочей температуры t в зоне узла герметизации

ные меры влагозащиты: окунание торцов тэнов в расплавленный парафин; соединение обоих концов тэна хлорвиниловой или термоусаживаемой трубкой, внутри которой помещается силикагель; упаковка группы тэнов в герметически запаенный полиэтиленовый чехол, внутри которого помещается силикагель.

Во ВНИИЭТО проводятся исследования по созданию высоконадежных узлов герметизации с применением новых материалов, в частности легкоплавких стекол.

Изоляторы для оснащения торцов тэнов. Изоляторы изготовляют из фарфора, стеатита и ситалла. Они обеспечивают требуемую электробезопасность тэнов за счет повышения электроизоляционных свойств торцовых частей нагревателей и увеличения пути токов утечки по поверхности между контактным выводом тэна и оболочкой. Необходимость применения изоляторов в тэнах возрастает при эксплуатации электронагревателей во влажных, агрессивных и запыленных средах. При работе тэнов в сухих отапливаемых помещениях, не содержащих большого количества пыли, и при условии надежной защиты торцовых частей тэна (с помощью кожухов, колпаков и т.п.) допускается изоляторы не применять, как это имеет место в ряде бытовых электроприборов.

Наиболее широкое применение находят изоляторы из фарфора как с глазурованной боковой и торцевой поверхностями, так и без применения глазури. В соответствии с требованиями стандарта (ГОСТ 20419-83) прочность на изгиб неглазурованного фарфорового образца составляет не менее 60 и 80 МПа, глазурованного — не менее 80 и 100 МПа; прочность на растяжение соответственно не менее 30 и 45 МПа для неглазурованного и 45 и 55 МПа — для глазурованного (первые цифры показателей прочности установлены для силикатного фарфора с массовой долей Al_2O_3 до 30%, вторые — для тонкодисперсного силикатного фарфора); остальные параметры фарфора: плотность не менее $2300 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, удельное объемное сопротивление не менее $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при температуре 200°C и не менее $10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при температуре 600°C . Электрическая прочность при переменном токе частотой 50 Гц — не менее $25 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$.

Водопоглощение фарфоровых изоляторов с глазурованными по-

верхностями составляет не более 0,5%. После пребывания в камере влажности в течение не менее 48 ч при относительной влажности $95 \pm 3\%$ и температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ фарфоровые изоляторы должны выдерживать в течение 1 мин воздействие испытательного переменного напряжения частотой 50 Гц, равного 500 и 2000 В соответственно для изоляторов, предназначенных для эксплуатации при номинальных напряжениях до 36 В включительно и свыше 36 В — до 380 В включительно.

Все большее распространение при изготовлении тэнов находят изоляторы из стеатитовой керамики, которая по сравнению с фарфором имеет меньшие диэлектрические потери и водопоглощение, более высокую механическую прочность и термическую стойкость. Основными фазами спеченной стеатитовой керамики являются метасиликат магния, стекло и газообразная фаза. Кроме того, в керамике в виде отдельных зерен содержатся кварц, кристобалит, форстерит, муллит и др. Химический состав стеатита марки СПК-2, выпускаемого производственным объединением "Электроизолятор", %, следующий: SiO_2 — 62,15; Al_2O_3 — 7,64; Fe_2O_3 — 0,66; CaO — 1,96; MgO — 26,78; Na_2O — 0,25; K_2O — 0,56.

Срок службы изоляторов из стеатитовой керамики не менее 5 лет. В отдельных случаях применяют изоляторы из ситалла марки IV-23. Приведем основные параметры ситалла IV-23:

Предел прочности при статическом изгибе, МПа, не менее	98
Удельное объемное сопротивление, Ом · м, при температуре $25 \pm 5^\circ\text{C}$	10^{10}
Электрическая прочность, МВ · м ⁻¹ , не менее	40
Кажущаяся плотность, кг · м ⁻³ , не менее	2400
Водопоглощение, %, не более	0,3%;
Термостойкость изоляторов, $^\circ\text{C}$, не менее	250 $^\circ\text{C}$

Изоляторы должны сохранять свои параметры и размеры в условиях эксплуатации при температуре окружающего воздуха от -60 до $+200^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 98% (при температуре $+35^\circ\text{C}$). Срок службы специальных изоляторов из ситалла для тэнов — 15 лет.

Сравнение характеристик изоляторов из различных материалов, а также опыт эксплуатации тэнов показывают, что для тэнов общего и бытового применения наиболее предпочтительными являются изоляторы из стеатита. Более низкие параметры имеют глазурованные изоляторы из фарфора; для наименее ответственных тэнов допустимо применять неглазурованные изоляторы.

В практике производства тэнов в отдельных случаях возникает необходимость проведения входного контроля качества изоляторов. Так, при производстве тэнов специального назначения имели место случаи, когда причиной низких значений электрической прочности и сопротивления изоляции нагревателей являлись изоляторы; при анализе причин массового брака тэнов оказалось, что изоляторы, изготовленные из ситалла, имели повышенное водопоглощение (более 0,3%).

В связи с этим рекомендуется периодически проводить входной контроль изоляторов на водопоглощение и электроизоляционные параметры.

Методы проверки изложены в стандартах (например, в ГОСТ 13871-78).

4. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЭНОВ, ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

По сравнению с нагревателями сопротивления открытого типа тэны и нагревательные кабели имеют ряд преимуществ:

- более высокие значения срока службы нагревателя и вероятности безотказной работы;

- повышенную электробезопасность и защиту обслуживающего персонала от прикосновения к токоведущим частям;

- стойкость к предельным значениям вибрационных и ударных нагрузок нагревательных устройств;

- относительно простую конструкцию и удобство эксплуатации;

- максимальные значения КПД, особенно для нагревательных устройств, в которых тэны находятся внутри нагреваемого тела (нагрев жидкостей, заливка тэнов в металлические формы и др.);

- большие возможности по обеспечению требуемой конфигурации тэнов с различной формойгиба в трех плоскостях;

- возможность применения практически для всех видов нагреваемых сред;

- возможность разветвления нагреваемой поверхности за счет применения радиального и продольного оребрения с различным шагом, высотой и толщиной металлических ребер;

- широким диапазоном рабочих температур в интервале от 50 до 750 °С и более.

Увеличение срока службы в тэнах и нагревательных кабелях обеспечивается за счет того, что к нагревательному элементу (спирали или жиле кабеля) доступ воздуха весьма ограничен и скорость окисления его в процессе эксплуатации по сравнению с негревателями открытого типа значительно ниже.

Повышенная защита от прикосновения к токоведущим частям достигается отсутствием электрического напряжения на наружной оболочке тэна и наличием в необходимых случаях коробок, обеспечивающих защиту контактных выводов тэнов и кабелей. При отсутствии таких коробок тэны и кабели, как правило, не защищены от прикосновения обслуживающего персонала к токоведущим частям.

Ударная и вибрационная стойкость тэнов и кабелей объясняется тем, что электроизоляционный наполнитель между нагревательным элементом и оболочкой спрессован до значения, близкого к предельно возможному, и исключает перемещение нагревательного элемента при эксплуатации.

Наиболее характерное применение тэнов и нагревательных кабелей в различных средах:

погружение нагревателей в жидкие среды, включая воду и растворы щелочей и кислот. При этом рабочее давление внутри жидких сред может достигать нескольких десятков мегапаскалей;

нагрев воздуха, различных газов и их смесей, в том числе взрывоопасных газовых сред; эти среды могут быть как в неподвижном состоянии, так и в среде с принудительным движением газовой смеси. Тэны используют как источник инфракрасного излучения, устанавливают в электропечи с естественной и принудительной циркуляцией воздуха для отжига и отпуска изделий, применяют в устройствах кондиционирования воздуха и аккумулирования тепла, в промышленных и сушильных установках (для сушки лакокрасочных покрытий, герметизирующих материалов и др.), в инфракрасных излучателях, в конвективных промышленных и бытовых электрообогревателях, в качестве конфорок электроплит и т.п.;

нагрев жиров и масел (в бытовых масляных радиаторах, масляных картерах различных машин и т.п.);

нагрев и плавление селитры, щелочно-селитровых смесей, щелочей (агрегаты для термообработки изделий в станкоинструментальной, метизной и других отраслях промышленности и т.п.);

плавление олова, алюминия, свинца, свинцово-сурьмянистых сплавов и других легкоплавких металлов (в типографиях, при производстве аккумуляторов и т.д.);

нагрев теплопроводностью изделий из металлов и других материалов (пресс-форм, литейных форм, штампов, плит и др.); тэны вставляют в специальные отверстия или заливают непосредственно в стенки обогреваемых изделий, предназначенных для сварки пластика, вулканизации, отливки и штамповки деталей и др.;

нагрев металлов, "тяжелой" воды и других теплоносителей в атомной энергетике;

в качестве нагревательного элемента различных электронагревательных устройств на всех видах транспорта (на тепловозах, железнодорожных вагонах, самолетах, троллейбусах, автобусах, автомобилях).

В связи с дефицитностью тэнов они до настоящего времени еще недостаточно применяются в ряде новых областей. Так, широкое применение тэнов для предпускового обогрева картеров двигателей, коробок передач и охлаждающих жидкостей двигателей тракторов, грузовых и легковых автомобилей позволит сэкономить в зимнее время значительное количество дефицитного топлива.

К недостаткам тэнов и нагревательных кабелей можно отнести их несколько большую инерционность, чем у нагревателей сопротивления открытого типа, необходимость вывода узла герметизации из зоны нагрева, где расположен тэн или нагревательный кабель, и обеспечения дополнительных условий эксплуатации, при которых исключается повреждение этого узла.

Кроме того, учитывая, что сечение жил нагревательного кабеля одинаково как внутри, так и вне опрессованного наполнителя, необходимо при использовании кабеля в качестве нагревателя предусматривать специальные конструкции узла или охлаждение наружных частей жил.

Глава вторая

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ТЭНОВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

5. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КРУГЛЫХ ДУХВОНЦЕВЫХ ТЭНОВ

Технология изготовления тэнов круглых двухконцевых, плоских и патронного типа, а также нагревательных кабелей имеет как одинаковые, так и специфические технологические операции, характерные для производства каждого из указанных видов нагревателей.

Учитывая, что производство и применение круглых двухконцевых тэнов носят более массовый характер, технологию их изготовления рассмотрим более подробно.

При изготовлении разнообразных типов и исполнений двухконцевых круглых тэнов имеются специфические особенности, характерные для каждого исполнения нагревателей (сложность и формагиба, наличие крепежной арматуры, оребренная или гладкая поверхность и т.п.). Производство тэнов малого диаметра (5–10 мм) также отличается рядом особенностей по сравнению с изготовлением нагревателей большого диаметра (12–18 мм). Нагреватели малого диаметра являются более компактными и экономичными, удельный расход материалов снижен по сравнению с расходом на изготовление тэнов большого диаметра в среднем в 1,5 раза. Однако требования к технологии их изготовления более высокие, так как толщина изоляции между спиралью и оболочкой тэнов малого диаметра в 2–4 раза меньше. Кроме того, эти нагреватели применяются в основном в бытовых электроприборах, значительная часть которых не имеет защитного заземления, что предъявляет дополнительные требования к качеству тэнов с точки зрения техники безопасности.

К основным технологическим операциям относятся:

- очистка труб от масла и других загрязнений;
- резка труб на заготовки мерной длины; снятие внутренних фасок и заусенцев;
- изготовление контактных стержней и спирали;
- соединение спирали с контактным стержнем;
- очистка нагревательного узла от масла и других загрязнений;
- входной контроль и подготовка (доработка) электротехнического периклаза;

наполнение трубы с нагревательным узлом периклазом и опрессовка тэнов;

подрезка торцов;

термообработка (отжиг) тэнов;

маркировка тэнов;

обрубка контактных стержней;

гиб тэнов;

выборка периклаза (в отдельных случаях производится догиба тэнов);

присоединение крепежной арматуры;

герметизация торцов;

контроль качества тэнов.

Помимо перечисленных основных операций, характерных для наиболее распространенных двухконцевых круглых тэнов, для производства некоторых исполнений нагревателей необходимы дополнительные операции (рихтовка трубы, присоединение токоподводящих флажков, оконцевателей, оребрение активной поверхности тэнов и др.).

Особенности выполнения отдельных технологических операций перечислены ниже. Краткое описание и принцип работы технологического оборудования для изготовления тэнов приведены в прилож. 4.

Очистка труб. Очистка труб от масла и окалины производится на заводах несколькими способами: промывкой растворителями, горячей водой, ультразвуковой очисткой, прокалкой при температуре до 800 °С, с помощью дробеструйной установки и прочистки шомполом.

Конкретный способ очистки принимается в зависимости от качества поставляемой трубы (наличия внутри твердых загрязнений, слоя и состава консервационной смазки), назначения нагревателей (прежде всего в зависимости от рабочей температуры оболочки тэна, определяющей требования к чистоте трубы), а также возможностей завода-изготовителя.

Для крупносерийного производства наиболее производительной и качественной является очистка на щелочно-кислотной ультразвуковой установке, состоящей из следующих операций: ультразвуковое щелочное обезжиривание, кислотное травление (удаление окалины с поверхности труб), предварительная нейтрализация, ультразвуковая нейтрализация, пассивация поверхности, сушка труб.

При любом способе очистки основным условием является высокая степень чистоты внутренней поверхности трубы. Особые требования предъявляются к качеству обезжиривания и полному отсутствию углеродсодержащих частиц (масла, солидола, остатков ветоши, ниток и т.п.).

Проведенные во ВНИИЭТО исследования показали, что снижение электроизоляционных свойств тэнов в рабочем состоянии происходит в десятки и тысячи раз даже при наличии незначительного количества углеродсодержащих загрязнений, особенно для нагревателей с высо-

кой рабочей температурой. Например, если взять предварительно хорошо очищенные трубы и опустить их в бензин, содержащий 0,10% масла, с последующей сушкой до полного испарения бензина, то все тэны, изготовленные с применением таких труб, после 6 ч работы при температуре 700 °С полностью теряют свою электроизоляцию, произойдет потемнение периклаза и короткое замыкание между спиралью и оболочкой нагревателя. Заметное снижение изоляции таких тэнов при температуре 700–800 °С может начаться уже через 5 мин после их включения. Потемнение периклаза при наличии в тэне углеродсодержащих веществ происходит не только при высоких температурах, но и при температуре периклаза 400 °С, т.е. у тэнов для нагрева воды, поэтому для обеспечения надежности работы тэнов у потребителя и устранения брака при их изготовлении необходимо уделять серьезное внимание контролю степени очистки как труб, так и спиралей и контактных стержней. ВНИИЭТО разработан руководящий технический материал (РТМ), который содержит рекомендации по обеспечению и контролю степени очистки и, в частности, предусматривает:

- проведение для высокотемпературных тэнов сушки всех металлических элементов нагревательного узла при температуре 300 °С не менее 1 ч или прокалку при температуре 600 °С в течение 5–10 мин (после операции обезжиривания в ультразвуковых установках или растворах);

- контроль качества обезжиривания поверхности трубы (после проталкивания плотного тампона из белой салфетки на ней не должно быть масляных пятен или других загрязнений);

- контроль чистоты обезжиривающей жидкости (на бумажке, смоченной в жидкости, после сушки не должно быть пятен масла); периодическое проведение более тщательного и сложного контроля для определения допустимого количества циклов использования обезжиривающего раствора.

Очистка трубы, выполняемая любыми способами, кроме ультразвукового, производится после резки труб на заготовки тэнов требуемой длины. Очистка на ультразвуковой установке выполняется, как правило, до резки труб, так как позволяет обрабатывать трубы такой длины, какая имеет место в состоянии поставки (до 6,5 м). Однако для получения более качественной очистки труб ее рекомендуется проводить на заготовках длиной до 2 м. Для изготовления высокотемпературных тэнов, а также тэнов бытового и специального назначения, имеющих высокие удельные поверхностные мощности, самым эффективным способом последнего этапа очистки труб и нагревательных узлов является их прокалка при температуре не менее 300 °С в течение 1–2 ч (для прокалки труб допускается температура 600 °С и более). Эту операцию рекомендуется проводить непосредственно перед наполнением периклазом трубы с нагревательным узлом. После проведения прокалки не допускается прикосновение руками к спирали нагревательного узла.

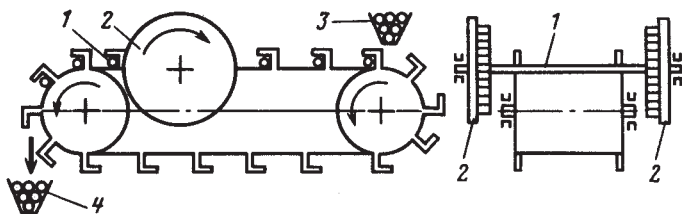


Рис. 20. Схема механизма зачистки труб металлическими щетками:

1 — обрабатываемые трубы; 2 — металлические щетки; 3 — накопитель труб-заготовок; 4 — накопитель обработанных труб-заготовок

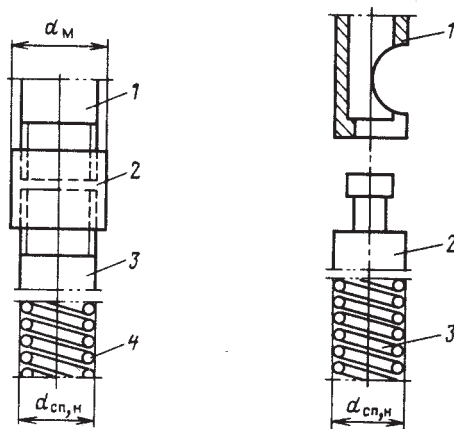
Резка труб на заготовки мерной длины, снятие внутренних фасок и заусенцев. Резка труб для тэнов осуществляется вращающимися металлическими или абразивными гладкими дисками, а также дисковыми фрезами. Эти разновидности режущего инструмента требуют различной скорости подачи и вращения при отрезке трубы, что при малой толщине ее стенки (0,6–0,8 мм) влияет на образование завальцовки трубы и трудоемкость последующего ее удаления.

Применение абразивного диска или металлической пилы позволяет отрезать трубы практически без внутренних фасок. В этом случае трудоемкость последующей операции (по сравнению с резкой гладкими металлическими дисками) может быть снижена в 2–3 раза за счет зачистки торцов трубы вращающимися металлическими щетками, устанавливаемыми с двух сторон пакета труб, движущегося по конвейеру. Схематически зачистка труб металлическими щетками (взамен операции снятия фаски) показана на рис. 20.

При резке труб гладкими металлическими дисками, а также абразивными дисками с относительно большой скоростью подачи на резку на трубе образуются внутренние фаски, требующие последующего их удаления с применением режущих инструментов (зенкеров). Этот способ менее производительный и более трудоемкий по сравнению с зачисткой торцов металлическими щетками.

При изготовлении электросварной трубы на заводе-изготовителе тэнов устройство для резки труб металлическими пилами устанавливают непосредственно в линии трубосварочного стана. Такая схема дает большой эффект в экономии материала (ликвидируются обрезки труб). Кроме того, при изготовлении трубы в потоке производства тэнов облегчается очистка трубы, так как она в этом случае не консервируется смазочными материалами, как это имеет место при получении трубы с трубных заводов.

Изготовление контактных стержней. Верхние контактные стержни (которые при вертикальной установке трубы нагревателя в наполнительную машину находятся в верхнем ее конце) имеют несколько разновидностей конструкции. Конструкция, приведенная на рис. 21, характерна



Р и с. 21. Метод крепления нагревательного элемента тэна в наполнительной машине с помощью муфты:

1 — стержень наполнительной машины; 2 — резьбовая муфта; 3 — контактный стержень; 4 — спираль нагревательного элемента тэна

Р и с. 22. Замковое соединение нагревательного элемента тэна со стержнем наполнительной машины:

1 — стержень наполнительной машины; 2 — контактный стержень; 3 — спираль нагревательного элемента тэна

наличием резьбовой муфты, соединяющей контактный стержень нагревателя со стержнем наполнительной машины. Эта конструкция упрощает изготовление контактного стержня (наружная часть его выполняется только за одну операцию методом накатки или нарезки резьбы), однако снижает качество нагревателя. Ухудшение качества происходит по той причине, что разница в наружном диаметре муфты d_m и нагревательной спирали $d_{сп, н}$ приводит в процессе наполнения нагревателя переклазом к значительному отклонению спирали от оси нагревателя. Недостаток такой конструкции сказывается тем больше, чем меньше диаметр нагревателя. При наружном диаметре тэна 8,5–5,0 мм номинальная толщина изоляционного слоя (между спиралью и трубой нагревателя) составляет 1,5–0,9 мм, а осевое отклонение спирали может достигать до одного миллиметра, что приводит не только к резкому снижению надежности тэнов и увеличению неравномерности температуры на их оболочке, но и к значительному увеличению брака по электрической прочности на заводе-изготовителе нагревателей.

На рис. 22 представлена конструкция наружной части контактного стержня, при которой соединение его со стержнем наполнительной машины производится без резьбовой муфты. При этом наружные диаметры стержня наполнительной машины, контактного стержня и нагревательной спирали одинаковы, что обеспечивает минимальное осевое

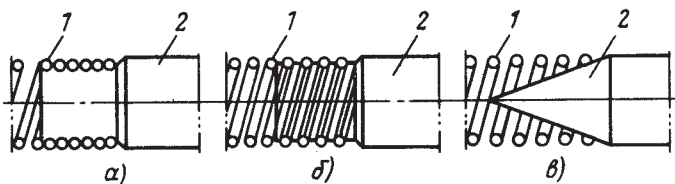


Рис. 23. Способы соединения спирали нагревательного элемента с контактным стержнем, внутренний конец которого имеет цилиндрическую (а), резьбовую (б) и коническую (в) поверхности:

1 — спираль нагревательного элемента; 2 — контактный стержень

отклонение спирали относительно трубы нагревателя. Такая конструкция является желательной при изготовлении всех видов тэнов и обязательной (с точки зрения качества) для тэнов малого диаметра. Зарубежные фирмы применяют, как правило, нагревательные стержни с наружной частью, указанной на рис. 22, изготовление которых производится в большинстве случаев на токарных автоматах.

Внутренняя часть контактного стержня (одинаковая как для верхних, так и для нижних стержней) имеет три основные разновидности: с резьбовым или гладким цилиндрическим концом и с коническим концом (рис. 23). Для всех разновидностей необходимо, чтобы наружный диаметр спирали независимо от диаметра проволоки спирали имел то же значение, что и диаметр стержня, и чтобы на конце стержня отсутствовали острые кромки, которые при опрессовке трубы с периклазом могут надрезать или полностью перерезать проволоку спирали.

Из двух разновидностей (рис. 23, а и б) первая предпочтительнее, так как снижает трудоемкость изготовления стержня, а главное, исключает разрыв проволоки спирали при обжатии нагревателей, в процессе которого 1–2 витка спирали сходят с первоначального положения на стержне.

Конструкция внутренней части стержня, показанная на рис. 21, в, позволяет унифицировать исполнение выводных стержней для различных типов спирали. Отдельные зарубежные фирмы, используя такую конструкцию выводного стержня и применяя одно-, двух или трехзаходную спираль, добились такой унификации, при которой все типоразмеры нагревателей одного наружного диаметра тэна (например, 8,5 мм) изготавливаются с одним и тем же диаметром контактного стержня независимо от диаметра проволоки. При этом упрощается и удешевляется не только операция изготовления стержней, но и изготовление спиралей, технологических пробок, оснастки наполнительных машин, организация учета и обеспечения в производстве нагревательных узлов большого разнообразия типоразмеров нагревателей. Однако технические требования к технологии и оборудованию при изготовлении стержня, сборки его со спиралью и сварке существенно повышаются.

Изготовление нагревательной спирали. Спираль изготавливают на спираленавивочных станках, которые автоматически отрезают заданную длину спирали. Учитывая, что для обеспечения высокого качества тэна необходимо при изготовлении спирали строго выдержать как заданное число витков, так и значение активного сопротивления, для соблюдения этих требований необходимо систематически контролировать активное сопротивление нихромовой проволоки, приходящееся на 1 м ее длины. При наличии отклонений этого параметра от заданного более чем на 1% необходимо вносить поправку в настройку навивочной машины (изменить заданное число витков спирали).

Важным условием при изготовлении спирали является ее повышенная жесткость, исключающая неравномерную растяжку витков спирали при установке ее в наполнительную машину и в процессе заполнения тэна периклазом. В отдельных случаях выполнение этого условия достигается за счет применения неотожженной проволоки сопротивления, что повышает жесткость спирали.

Соединение спирали с контактным стержнем. Для обеспечения требуемого качества сварного соединения необходимо:

- сместить один из электродов сварочной машины таким образом, чтобы он опирался на контактный стержень вне зоны навивки спирали; производить сварку спирали со стержнем в двух-трех точках;

- выдерживать минимально допустимое время между каждым циклом сварки, указанное в паспорте сварочной машины, так как, например, для конденсаторной машины увеличение производительности сварки приводит к уменьшению сварочного тока (для сварочной машины типа ТКМ-7 время сварки для трех точек должно быть не менее 5 с);

- периодически контролировать и регулировать значение сварочного тока и усилие прижатия электродов, исключающее сплющивание спирали или ее прожог.

Перед операцией сварки необходима проверка фактического электрического сопротивления спирали в сборке с контактными стержнями и при необходимости — регулировка сопротивления.

Очистка контактных стержней и спиралей производится после сборки нагревательного узла и выполняется теми же способами и с теми же критериями качества, что и очистка внутренней поверхности трубы, описанная выше.

Входной контроль и подготовка (доработка) электротехнического периклаза. В зависимости от конструкции и назначения тэнов к периклазу могут предъявляться различные требования.

Требования к зерновому составу периклаза, особенно наиболее крупных его фракций, определяются как диаметром нагревателя, так и расстоянием между витками спирали. ГОСТ на отечественный крупнозернистый периклаз допускает наличие до 2% фракции менее 0,63 и более 0,5 мм. Однако на практике нередки случаи наличия в периклазе и более крупных фракций, что при зазоре между витками спирали, а

также между направляющими трубками наполнительной машины менее 0,6–0,8 мм приведет к неравномерному заполнению тэна периклазом и, как правило, к браку.

В связи с этим рекомендуется проводить входной контроль всего зернового состава периклаза или его верхних фракций на каждой полученной партии. Контроль проводится на серийно выпускаемом лабораторном приборе для определения зернового состава модели 029. Наиболее мелкие фракции периклаза 0,063–0,04 и менее 0,04 мм (пыль) имеют, как правило, наибольшее количество вредных примесей, содержащихся в периклазе, и характеризуются в несколько раз более высоким влагопоглощением, чем более крупные фракции периклаза. Оба обстоятельства приводят к снижению электроизоляционных свойств тэнов иногда в десятки и сотни раз. Поэтому рекомендуется периодически проверять содержание в периклазе этих фракций, которое не должно превышать норм, установленных ГОСТом.

Помимо указанного зерновой состав влияет на сыпучесть периклаза и, что особенно важно, на плотность заполнения тэна наполнителем, которая, в свою очередь, определяет плотность опрессовки нагревателя, удлинение оболочки тэна при прокатке и связанные с этим потери материала (трубы, периклаза) при отрезке концов трубы после опрессовки. Наиболее предпочтительным является такой зерновой состав периклаза, который обеспечивает плотность при качественной работе наполнительной машины не менее $2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. В практике производства тэнов возникает необходимость доработки периклаза по зерновому составу путем отсева верхних фракций (более 0,5 и даже 0,4 мм) и пыли.

Наличие в периклазе химически связанной влаги косвенно определяется в соответствии с ГОСТ 13236-83 путем определения изменения массы при прокаливании при температуре 1000°C , которое не должно превышать 0,10–0,20% первоначальной массы. Эта характеристика периклаза является одной из наиболее важных как при изготовлении тэнов, так и для обеспечения их качества и надежности при эксплуатации.

Особенностью электротехнического периклаза является его высокое влагопоглощение и резкое (в сотни раз) снижение при этом электроизоляционных свойств. Присутствие в периклазе непроплавленных частиц приводит к еще большему увеличению его влагопоглощения, при содержании частиц до 5% влагопоглощение периклаза возрастало в 7 раз [7]. При повышении температуры тэна, содержащего увлажненный периклаз, внутри оболочки создается высокое давление водяного пара, которое нередко приводит к выдавливанию с большой линейной скоростью выводных стержней (выстреливанию), к местным разбуханиям оболочки нагревателя. Отрицательное влияние увлажненного периклаза усугубляется тем, что в нем интенсивно происходит химическое связывание влаги (гидратация), которая эффективно может быть удалена лишь при нагреве до температуры 700°C и более.

Химическая формула связывания влаги



поэтому тэны с химически связанной влагой в периклазе после просушки при температуре 150–200 °С могут иметь удовлетворительную изоляцию, а при включении их в работу произойдет выделение влаги и, следовательно, резкое снижение изоляции вплоть до электрического пробоя. Отрицательное влияние влаги в последнем случае усиливается за счет того, что подача на тэн электрического напряжения производится, как правило, у потребителя, когда торцы тэна загерметизированы и, следовательно, удаление влаги весьма затруднено.

Крайне отрицательное влияние увлажнения и гидратации периклаза иллюстрируется следующим опытом: 10 штук качественных тэнов, изготовленных без герметизации торцов, поместили на одни сутки в климатическую камеру с относительной влажностью 98% при температуре 35 °С. После этого тэны просушили при температуре 150 °С, загерметизировали, подключили к электрической сети и нагрели до температуры на оболочке 700 °С. В течение короткого времени на всех 10 тэнах произошли пробой изоляции и короткое замыкание.

На практике нередко случаи, когда периклаз находится несколько недель или даже месяцев в процессе транспортирования и хранения с нарушенной герметичностью упаковки. Если относительная влажность окружающей среды не превышала весь этот период более 75%, то влагосодержание периклаза повысится незначительно. Если же влажность составляла при этом (даже короткое время) более 80%, то влагосодержание периклаза может достигнуть 1%, т.е. 10 г воды на 1 кг периклаза. Такой материал должен быть прокален при температуре 700–750 °С в течение 4 ч, причем высота слоя прокаливаемого периклаза не должна превышать 100 мм. При незначительном увлажнении, не превышающем установленных стандартом норм изменения массы при прокаливании, достаточно просушить периклаз при температуре 150–200 °С.

Отрицательное влияние влаги на периклаз диктует необходимость хранить его с момента распаковки герметичной тары в сушильных шкафах при температуре 150 °С. Это же требование должно соблюдаться на всех операциях изготовления тэнов вплоть до их герметизации, если перерыв после каждой операции изготовления превышает 0,5 ч. На некоторых зарубежных фирмах устанавливаются сушильные шкафы для хранения в них тэнов в тех случаях, когда происходит кратковременный перерыв после каждой из операций — наполнения периклазом, опрессовки, обработки торцов, гибки и так далее, т.е. с момента наполнения периклазом до момента герметизации.

Наличие в периклазе свободных металлических частиц и ряда оксидов металлов также снижает электроизоляционные свойства тэнов в горячем состоянии.

Таблица 11

Количество циклов сепарации	Содержание Fe_2O_3 , %	Электрическая прочность, $\text{МВ} \cdot \text{м}^{-1}$	Удельное объемное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$, при температуре, $^{\circ}\text{C}$		
			1000	800	600
0	0,140	0,95	$3,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^5$	$4,04 \cdot 10^6$
2	0,063	1,03	$4,6 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	$4,73 \cdot 10^6$
3	0,060	1,11	$4,5 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^5$	$5,08 \cdot 10^6$
5	0,056	1,18	$4,9 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^5$	$5,26 \cdot 10^6$

Стандарт предъявляет к поставщику периклаза высокие требования к химическому составу порошка, в том числе и к содержанию в нем свободного и химически связанного железа, для выполнения которых проводится тщательная и многократная магнитная сепарация периклаза в процессе его изготовления. Однако на практике нередки случаи наличия в периклазе металлических включений, что вынуждает проводить входной контроль по этому параметру, а в необходимых случаях — дополнительную магнитную сепарацию периклаза на заводе-изготовителе тэнов.

Для обеспечения качественной сепарации необходимо применение электромагнитов с напряженностью магнитного поля не менее $1400 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ при высоте слоя периклаза не более 10 мм. Кроме того, следует тщательно и своевременно очищать их от улавливаемых магнитных включений, так как в их число входят часть окислов железа, обладающих слабой магнитной восприимчивостью, и мельчайшие частицы железа, в том числе находящиеся внутри комочков пыли периклаза; при несвоевременном удалении таких включений они легко отрываются от магнитной ловушки и возвращаются в периклаз.

Эффективность тщательной магнитной сепарации видна из табл. 11, в которой приведены электротехнические параметры партии готового периклаза до магнитной сепарации и после пропускания одного и того же периклаза через высокоэффективный полиградиентный сепаратор от 2 до 5 раз.

Из таблицы видно, что только за счет магнитной сепарации электроизоляционные свойства периклаза могут быть повышены в несколько раз.

С учетом наличия многих факторов, резко снижающих качество периклаза, при проведении входного контроля по вышеуказанным параметрам эффективной является результирующая проверка на ток утечки в горячем состоянии. Эта проверка выявляет суммарное влияние практически всех факторов на основной параметр периклаза — обеспечение высоких электроизоляционных свойств тэнов в горячем состоянии. Измерения токов утечки проводятся по методике ВНИИЭТО, которая рекомендована для внедрения на заводах-изготовителях и потребителях периклаза.

Наполнение трубы с нагревательным узлом периклазом и опрессовка тэнов. При наполнении периклазом трубы, внутри которой помещен нагревательный узел, необходимо строго выполнять ряд условий, которые влияют как на качество последующей опрессовки тэнов, так и на конечные результаты процесса изготовления нагревателей. Основными из этих условий являются: соблюдение соосности спирали с трубой тэна, равномерное заполнение внутреннего объема периклазом в осевом и радиальном направлениях и обеспечение максимальной плотности утряски периклаза.

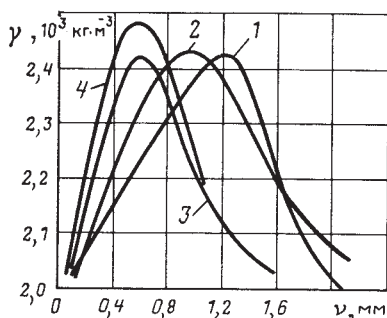
Требуемая соосность спирали (отклонение 0,1–0,2 мм) может быть обеспечена только при условии применения конструкции наружной части выводного стержня, показанной на рис. 22. Зазоры между внутренней направляющей трубкой наполнительной машины и всеми элементами нагревательного узла (выводной стержень, спираль) и стержнем наполнительной машины, удерживающим спираль, а также между наружной направляющей трубкой машины и внутренней поверхностью трубы тэна не должно быть более 0,2 мм. Нарушения соосности на практике нередко имеют место также при некачественном изготовлении нижней технологической пробки или несоосной сборке ее с нижним выводным стержнем и трубой тэна; при этом происходит отклонение от соосности не только спирали, но и нижнего выводного стержня, что приводит к браку при производстве тэнов или к быстрому выходу их из строя при эксплуатации. Систематический контроль соосности спирали производится косвенным методом — испытанием на электрическую прочность изоляционного слоя. Прямой контроль — рентгеновское просвечивание в двух (или более) плоскостях является дорогостоящим и проводится периодически.

Обеспечение равномерного заполнения периклаза и максимальной плотности его утряски (не менее $2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) достигается за счет применения периклаза высокого качества (по сыпучести и зерновому составу) и рационального режима вибрации трубки тэна, создаваемого вибраторами наполнительной машины. Не менее важным является требование обеспечения минимального разброса плотности утряски периклаза как между тэнами, устанавливаемыми одновременно на наполнительную машину (до 24 шт.), так и между всеми тэнами, заполненными на нескольких наполнительных машинах в течение одной или нескольких рабочих смен. На практике плотность периклаза после его утряски в тэне иногда колеблется от 2100 до $2500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Приблизительно можно считать, что процентный разброс удлинения тэнов после обжаривания в 2 раза превышает разброс плотности утряски периклаза на наполнительной машине.

Таким образом, при оптимальной плотности $2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ и колебаниях ее от 2100 до $2500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ разброс составит более 16%, что приведет к разбросу удлинения тэнов после обжаривания в размере 30–35%. Учитывая, что весь разброс удлинения тэнов практически является безвоз-

Р и с. 24. Зависимость уплотнения периклаза от амплитуды ν и частоты f вибрации:

1 — при $f = 30$ Гц; 2 — при $f = 40$ Гц;
3 — при $f = 50$ Гц; 4 — при $f = 60$ Гц



вратным отходом остродефицитных материалов (труба, периклаз), очевидно, что разброс плотности периклаза должен быть минимальным. Удовлетворительным является разброс плотности до 2%, что соответствует разбросу удлинения тэнов и отходам материалов до 4%. Для обеспечения таких показателей необходимо систематически контролировать:

зерновой состав и сыпучесть периклаза, которая при прочих равных условиях улучшается при минимальном содержании влаги в периклазе; в этом направлении эффективным мероприятием является постоянный подогрев периклаза в бункере наполнительной машины, обеспечиваемый обычно установкой в бункере трубчатых электронагревателей;

соблюдение рационального режима работы вибратора наполнительной машины по частоте и амплитуде колебаний, которые являются регулируемыми параметрами. Зависимость плотности наполнения периклазом от амплитуды при различных частотах колебаний вибратора приведена на графике рис. 24.

Наряду с имеющей место неравномерностью плотности заполнения периклазом на различных ручьях наполнительной машины, разных машинах и различных партиях тэнов, изготовленных на одних и тех же машинах в течение смены или нескольких смен, характерной "болезнью" при выполнении этой операции является недостаточная плотность периклаза в верхней части нагревателя, установленного на наполнительную машину. Этот недостаток приводит к слабой степени уплотнения периклаза на конце тэна после обжатия, что влечет за собой слабое закрепление выводного стержня нагревателя, проворачивание его в процессе эксплуатации и обрыв спирали. Бывают случаи настолько слабого уплотнения периклаза на конце трубки, что наполнитель после обжатия высыпается из тэна. Эффективными мерами устранения таких недостатков является постоянный контроль плотности на верхних концах тэнов (при съеме их с наполнительной машины) перед установкой верхней пробки, а также строгое соблюдение условия работы наполнительной машины, при котором вибрация нагревателя продолжается некоторое время после окончания заполнения его периклазом. Кроме того, для доуплотнения "слабых" концов нагревателя необходимо направлять его в

прокатную машину тем концом, который на наполнительной машине находился внизу.

Необходимо также отметить, что на качество тэнов по равномерному шагу витков спирали (и, следовательно, по перепаду температуры по длине нагревателя) существенно влияет правильность конструктивного выбора нагревательного элемента, в частности диаметра проволоки, внутреннего диаметра и шага спирали. При малых диаметрах проволоки (менее 0,25 мм) и большом отношении внутреннего диаметра спирали к диаметру проволоки (более 6 при проволоке диаметром 0,2–0,3 мм и более 8 при проволоке диаметром 0,3–0,45 мм) спираль в процессе заполнения периклаза растягивается в верхней и сгущается в нижней части нагревателя. В процессе последующей опрессовки тэна спираль с указанными параметрами может иметь еще большие растяжение и сгущение витков на противоположных концах спирали, что приводит к неравномерности распределения генерируемого теплового потока по длине нагревателя. На участках с уменьшенным шагом витков температура спирали может значительно (иногда на несколько сот градусов) превышать расчетную и как следствие снизить надежность тэна.

В связи с этим для улучшения качества тэнов необходимо при их изготовлении добиваться повышения равномерности шага витков спирали по длине нагревателя.

К основным факторам, вызывающим неравномерность шага, следует отнести следующие: обусловленное допусками изменение диаметра проволоки по ее длине; возможные колебания усилия натяжения проволоки при навивке спирали (отсюда различие диаметров и жесткости отдельных витков спирали); увеличение растягивающего усилия на верхние витки вертикально расположенной спирали за счет массы нижних витков. Последний фактор закономерен, и степень его влияния на погрешность шага можно оценить количественно; остальные факторы носят случайный характер.

Проведенные во ВНИИЭТО исследования позволили определить для принятой на отечественных предприятиях технологии изготовления тэнов (спираль навивают на оправку виток к витку, а затем растягивают внутри трубы—заготовки тэна до необходимой длины) степень влияния растяжения спирали, диаметра проволоки и значения отношения ее среднего диаметра к диаметру проволоки на растягивающее усилие в зонах упругой и пластической деформаций. Получена эмпирическая зависимость погрешности шага спирали ξ_g , возникающей в результате воздействия массы спирали и основных ее параметров (для широко используемых спиралей с коэффициентом шага более 2, т.е. деформируемым при растяжении за пределом упругости), %:

$$\xi_g = \frac{4,86 \cdot 10^{-4} C^{2,5} L_{\text{сп}}}{K^2 d_{\text{пр}}^{0,2}}, \quad (4)$$

где C — отношение среднего диаметра спирали к диаметру проволоки;

$L_{\text{сп}}$ — длина спирали в растянутом состоянии, мм; $d_{\text{пр}}$ — диаметр проволоки, мм; K — коэффициент шага спирали, равный отношению шага спирали к диаметру проволоки.

Расчеты по (4) показывают, что при некоторых сочетаниях определяющих параметров спирали погрешность может достигать нескольких десятков процентов. Поэтому при проектировании тэнов необходимо учитывать влияние геометрических характеристик спирали на погрешность и выбирать наиболее рациональные соотношения.

При изготовлении тэнов, предназначенных для работы в жестких температурных режимах или к качеству которых предъявляют повышенные требования (при $K > 2$), спирали целесообразно изготавливать не методом плотной навивки виток к витку, а путем навивки с предварительным заданным шагом так, чтобы коэффициент шага навивки спирали отличался от требуемого на 0,5—1. В этом случае растяжение спирали до необходимого размера будет происходить только упруго.

В результате математической обработки экспериментальных данных получено уравнение, отражающее влияние (для зоны упругой деформации) определяющих параметров спирали на погрешность шага под действием силы тяжести, %:

$$\xi_{g \text{ упр}} = 1,63c^3 L_{\text{сп}} / 10^5 K^2. \quad (5)$$

Из сопоставления (4) и (5) видно, что при изготовлении спиралей из заготовок, навитых с шагом, близким к требуемому, погрешность ξ_g снизится в 10—15 раз. В связи с этим влияние массы спирали на погрешность шага практически исключается даже при производстве тэнов длиной 5—6 м. Исследования показали, что у спиралей, изготовленных указанным способом, не только резко сокращается погрешность ξ_g , но и приблизительно в 2 раза уменьшается размер случайных погрешностей. Кроме того, снижаются погрешности шага спиралей, возникающие на стадии навивки наполнителя, так как их сопротивляемость внешним механическим воздействиям значительно выше, чем у спиралей, растягиваемых за пределом упругости.

В процессе опрессовки нагревателя большинство отрицательных факторов, имеющих место при заполнении трубы периклазом, усиливают влияние на снижение качества тэнов. При этом одним из основных факторов является плотность заполнения трубы тэна периклазом и степень его уплотнения при опрессовке. Оптимальная плотность периклаза в готовом тэне составляет примерно $\approx 3050 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. При этом теплопроводность периклаза, а следовательно, и перепад температуры между спиралью и оболочкой нагревателя также оптимальные: теплопроводность такого периклаза при температуре, например, 500°C хуже, чем теплопроводность плавленого оксида магния в блоке (до измельчения в порошок), в 4—5 раз, но лучше, чем теплопроводность периклаза в тэне до обжигания (т.е. при плотности $2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$), более чем в 2 раза.

Требуемая плотность обжигания может быть достигнута как при относительно низкой плотности наполнения периклаза на набивочной машине ($2100\text{--}2200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) за счет большой степени опрессовки трубки тэна (до 22%), так и при рациональной плотности набивки ($2400\text{--}2450 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) за счет гораздо меньшей степени опрессовки трубки тэна (13–15%). Многоступенчатый процесс опрессовки проходит таким образом, что на первых ступенях уплотнение периклаза пропорционально степени опрессовки, а удлинение тэна весьма незначительно; на последних ступенях опрессовки, наоборот, уплотнение периклаза уменьшается, а удлинение тэна резко возрастает. С ростом степени опрессовки происходит измельчение зерен периклаза, что в свою очередь ведет к повышению его влагопоглощающих свойств и в еще большей степени — к нарушению кристаллической решетки зерен и снижению в 1,5–2 раза электроизоляционных свойств периклаза.

Кроме того, большая степень опрессовки способствует увеличению разброса удлинения тэна, значительному изменению электрического сопротивления спирали в сторону его уменьшения. Таким образом, для обеспечения требуемой плотности периклаза при опрессовке и сведения до минимума связанных с этим процессом отрицательных факторов необходимо добиваться максимально возможной плотности набивки периклаза (но не менее $2400 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) на наполнительной машине.

Подрезка торцов. Торцы трубы тэна по традиционной технологии обрабатывают на станках различных конструкций способом резания. Более прогрессивной и экономичной является технология получения заданной длины нагревателя без подрезки торцов. Например, применяют способ, при котором опрессовка тэна производится с минусовым допуском относительно номинальной длины готового нагревателя, затем трубка тэна прочно захватывается на концах и растягивается до номинального размера. (Рекомендуется растягивать на длину не более 2% длины тэна.) Технологические пробки при этом извлекают специальной машиной; в этом случае их изготавливают из резины или выжигают во время отжига (пробки изготавливаются из полиэтилена).

Существует способ изготовления тэнов без подрезки, который основан на строгом соблюдении всех требований технологического процесса и применении материалов с минимальными отклонениями параметров (минимальный разброс фракции периклаза, допусков на диаметр и толщину стенки трубы и т.п.). При этом способе размер нагревателя после обжигания соответствует номинальному, а при возникновении каких-либо отклонений оперативно вводится поправка в технологический процесс, обеспечивающая номинальный размер тэна (например, оперативно изменяется длина заготовки трубы, степень обжигания и др.).

Термообработка (отжиг) тэнов. Из трех основных способов нагрева — индукционного (токами высокой частоты), контактного и нагрева в электрической печи сопротивления — наиболее предпочтительным при серийном производстве тэнов является последний. При наличии кон-

вейерных электропечей с окислительной и защитной атмосферами этот способ имеет следующие преимущества:

наибольшее время выдержки при заданной температуре отжига ($750-800^{\circ}\text{C}$ для стали 10 и $1000-1050^{\circ}\text{C}$ для стали 12X18H10T), составляющее 20–80 мин;

высокая производительность — 1500–3000 м в смену при минимальной трудоемкости (один рабочий может обслуживать 2 печи);

возможность получения светлой поверхности;

устранение операций выборки периклаза и технологических пробок (пробки выгорают в печи), что резко снижает трудоемкость изготовления тэнов за счет внедрения технологии без подрезки концов;

возможность изготовления тэнов, оребренных непрерывной спиралеобразной металлической лентой; в этом случае оребрение производится на специальном станке, а припайка ленты к трубе происходит в печи в процессе отжига тэнов за счет намотанной одновременно с лентой присадочной проволоки.

Кроме того, отжиг в конвейерных электропечах существенно улучшает электроизоляционные параметры за счет относительно длительной термической обработки периклаза в тэне.

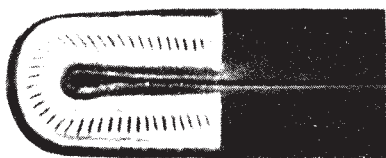
Маркировка тэнов. На многих заводах маркировка выполняется как отдельная операция и, следовательно, требует дополнительных затрат. Более совершенной является технология, при которой осуществляется автоматическая маркировка — способом накатки за счет установки приставки к прокатному стану. Для тэнов малого диаметра второй способ более предпочтителен, так как помимо снижения трудоемкости уменьшает вероятность повреждения тонкостенной трубки нагревателя.

В отдельных случаях применяют электрографический и электрохимический способы маркировки.

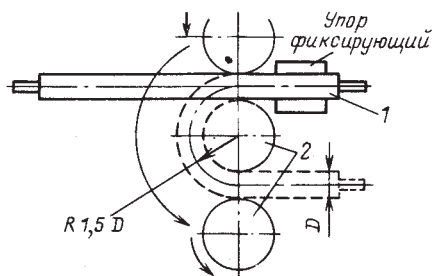
Гиб тэнов. Гиб тэнов производится в различных плоскостях с радиусомгиба, как правило, не менее двух с половиной диаметров нагревателя (по его оси). Однако требования потребителей и необходимость уменьшения габаритных размеров нагревателей, материалоемкости нагревательных устройств ставят задачу выпуска нагревателей с меньшим радиусомгиба, включая тэны с внутренним радиусом, близким к нулю (рис. 25). Некоторыми зарубежными фирмами и опытным заводом ВНИИЭТО освоен выпуск таких нагревателей. Основные требования и параметры тэнов при нулевом внутреннем радиусегиба следующие:

отжиг тэнов после опрессовки необходимо проводить в печи с выдержкой при рабочей температуре (1050°C для нержавеющей трубы) 3 ч;

предварительное изгибание осуществляется до радиуса, равного 1,5 диаметра трубы (по оси), на гибочном стане (рис. 26) при плавном, без рывков изгибании;



Р и с. 25. Тэн с нулевым радиусомгиба



Р и с. 26. Схема гибки тэна на гибочном стане:

1 — тэн; 2 — гибочные ролики; — — — — тэн до гибки, — — — — тэн после гибки

окончательное изгибание до нулевого внутреннего радиуса обеспечивается на прессе (усилие 1,57 МН) за счет специальной оснастки (рис. 27). Скорость изгибания 10 мм/с;

для тэнов диаметром более 13 мм между предварительным и окончательным изгибаниями необходимо проведение повторного отжига;

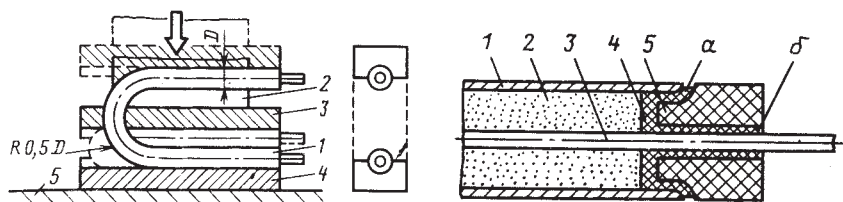
электрическая прочность изоляции в холодном состоянии после предварительного изгибания падает на 30—40%, затем повышается после окончательного изгибания (оставаясь при этом не ниже норм, регламентированных ГОСТ 13268-83);

при внутреннем радиусе изгибания менее 10 мм на оболочке трубы возможно появление микротрещин глубиной 0,05—0,1 мм.

С уменьшением радиусагиба тэнов все более заметно проявляется снижение его электроизоляционных параметров за счет уменьшения плотности опрессовки периклаза с внешней стороны спирали. В связи с этим условия повышения качества тэнов диктуют необходимость производить допрессовку тэнов в местегиба, осуществляемую на прессах с применением специальных штампов.

Выборка периклаза. Выборка периклаза производится, как правило, зубчатой шарошкой на механических станках. При этом весьма важным является условие, чтобы на внутренней стенке трубы и наружной поверхности выводного стержня на всей длине участка заполнения герметика не оставалось крупинок периклаза. На практике имеют место случаи такой выборки периклаза, при которой на металлической поверхности имеются не только крупинки, а сплошной слой периклаза. В этом случае качество герметизации резко ухудшается, так как герметизирующие материалы имеют определенную степень адгезии к чистой поверхности металла, которая снижается во много раз при наличии на ней периклаза.

Хорошая степень очистки требует точного изготовления и частой смены шарошек (по мере их износа), соблюдения минимального отклонения размера внутреннего диаметра трубки тэна от заданного (соответствующего наружному диаметру шарошки). Выполнение этих требова-



Р и с. 27. Схема гибки тэна на прессе:

1 — тэн до гибки; 2 — пуансон; 3, 4 — верхняя и нижняя призмы приспособления; 5 — стол прессы; — — — — — тэн до гибки; - - - - - тэн после гибки

Р и с. 28. Узел герметизации тэна:

1 — оболочка; 2 — периклаз; 3 — контактный стержень; 4 — герметик; 5 — изолятор; а — зона герметика между изолятором и периклазом; б — то же между изолятором и контактным стержнем

ний является обязательным, так как недостаточная очистка трубы и выводного стержня приводит к образованию в герметике тэна микроскопических "дырок", резкому ускорению увлажнения периклаза и выходу из строя нагревателей у потребителя, происходящего иногда при первом же включении.

Имеется несколько способов, обеспечивающих по сравнению с выборкой зубчатой шарошкой более качественную очистку поверхности: применение поступательно движущейся с ультразвуковой вибрацией металлической фольги;

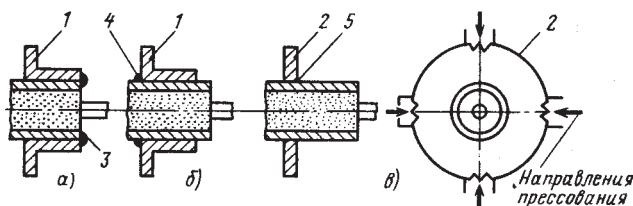
применение литых резиновых технологических пробок, которые после опрессовки тэна извлекаются на специальном станке;

способ, аналогичный предыдущему, отличающийся тем, что технологические пробки изготавливаются из полиэтилена и выжигаются в электропечи одновременно с отжигом тэнов.

Последний способ является наиболее предпочтительным, так как не требует выполнения отдельной операции выборки периклаза и обеспечивает высокую степень чистоты внутренней поверхности трубы и поверхности контактного стержня. Указанные способы освоены на Фастовском ЗЭТО.

Особо высокое качество очистки металлических поверхностей под герметик достигается за счет использования дробеструйной установки, которая очищает эти поверхности до металлического блеска и полностью исключает наличие на них зерен периклаза.

Необходимо также отметить важное значение глубины выборки периклаза, которая (рис. 28) должна обеспечивать полное введение в трубку внутренней шейки изолятора и оптимальную толщину слоя герметика. На практике имеют место случаи как чрезмерно малой, так и чрезмерно большой глубины выборки периклаза. В первом случае внутренняя шейка изолятора оказывается на одном уровне с торцом трубы (при



Р и с. 29. Способы крепления штуцера и крепежной шайбы к тэну:

аргонодуговой сваркой (а); пикой (б); опрессовкой (в) (1 — штуцер; 2 — крепежная шайба; 3 — сварной шов; 4 — паяный шов; 5 — соединение опрессовкой)

этом установка изолятора теряет смысл); во втором случае установка изолятора даже приносит вред, так как образующаяся при этом щель между слоем герметика и внутренним торцом изолятора является сборником влаги и пыли, что способствует возникновению короткого замыкания между трубой и контактным стержнем.

Присоединение крепежной арматуры. Присоединение крепежной арматуры (штуцеров, крепежных шайб и т.п.) производится в большинстве случаев с применением аргонодуговой сварки торца трубы с торцом штуцера (рис. 29, а) или пайки (рис. 29, б). Производить аргонодуговую сварку катетным швом к цилиндрической части трубы тэна не допускается, так как эта операция часто приводит к прожогу трубы; в этом случае применяют пайку или микроплазменную сварку.

Более прогрессивным способом как изготовления, так и крепления штуцеров является применение алюминиевого литья под давлением, при котором штуцер отливается в литейной машине непосредственно на оболочке тэна. Этот способ освоен на Узбекском ПО "Электротерм".

Гораздо более производительным, чем сварка или пайка, является способ прессования в радиальном направлении буртика штуцера (на ребро) в четырех равномерно расположенных по окружности точках. Этот способ освоен Московским заводом "Торгмаш" и Фастовским ЗЭТО при изготовлении тэнов для нагрева газовых сред. Он применяется также для оснащения тэнов крепежными шайбами (рис. 29, в) и пригоден для тэнов, эксплуатируемых в воздушной среде, не требующих гарантированной плотности соединения оболочки с крепежной арматурой.

Герметизация торцов. Торцы герметизируют при обязательном условии предварительной их сушки и обеспечения сопротивления изоляции в холодном состоянии не менее 1000 МОм. При использовании герметика типа "виксинт" его наносят в таком количестве, чтобы при монтаже изолятора герметик выдавливался и заполнял зазоры а и б (см. рис. 28). При таком исполнении узла герметизации обеспечивается (при условии качественной очистки от периклаза, ржавчины и масел внутренней поверхности трубы и поверхности контактного стержня) максимальная

адгезия герметика к металлическим поверхностям тэна и исключается образование "дырок" в местах их соприкосновения.

При применении кремнийорганических лаков толщина слоя герметика (пленки) должна быть не более 0,5 мм и, как правило (в зависимости от марки кремнийорганического лака или эмали), необходима последующая термообработка узла герметизации — "запечка" лака. Время и температура выдержки при термообработке определяются по инструкции завода-изготовителя кремнийорганического лака или эмали.

Несоблюдение требований по минимальной толщине пленки кремнийорганического лака (или эмали) приводит к образованию во время термообработки большого количества газовых пузырьков, которые резко снижают влагозащитные свойства тэнов.

Наиболее качественной является технология герметизации кремнийорганическими лаками, которая предусматривает заполнение лаком всей полости, образованной в результате выборки периклаза; непосредственно после этого излишки лака удаляются с соблюдением условия, чтобы на торцевой части периклаза, внутренней поверхности оболочки трубы и поверхности контактного стержня осталась тонкая пленка лака, затем указанная операция повторяется, что обеспечивает гарантированное наличие равномерной и тонкой пленки лака на упомянутых поверхностях; далее производится термообработка с контролем температуры и времени подъема и выдержки температуры; после проведения указанных операций устанавливается изолятор.

Во избежание образования зазора между лаком и внутренним торцом изолятора проводится 100%-ный контроль глубины выборки периклаза и выполняется условие, чтобы внутренний торец изолятора плотно соприкасался с пленкой лака или эмали. При качественном выполнении узла герметизации сопротивление изоляции тэна все же снижается, однако в десятки и сотни раз медленнее, чем в случаях, когда технология герметизации нарушается.

Снижение сопротивления изоляции в первом случае (с 1000 МОм до 1–5 МОм) при условии нахождения тэна без включения его в сеть в самых неблагоприятных условиях (98%-ной относительной влажности при температуре 35 °С происходит в течение 60–120 сут, а при более благоприятных условиях (относительной влажности 70% и менее) сопротивление изоляции снижается незначительно даже после нескольких лет хранения. Во втором случае сопротивление изоляции может снизиться в течение 2–3 сут и нижний его предел не ограничивается значением $5 \cdot 10^5$ Ом, при котором тэн работоспособен, а может опуститься до нуля, что может привести к короткому замыканию. Снижение сопротивления изоляции даже при качественной герметизации тэна объясняется свойством всех известных герметиков пропускать пары влаги; однако после включения нагревателя в работу происходит удаление влаги и сопротивление изоляции увеличивается.

При герметизации компаундным клеем К400 и другими эпоксидными компаундами высокое сопротивление изоляции тэна сохраняется годами, однако недостатком эпоксидных герметиков является их низкая стойкость к повышенным температурам; качество такого узла герметизации тэна резко снижается после термоциклирования нагревателя даже при температуре в зоне узла герметизации 100–120 °С.

Наиболее стойкими к проникновению влаги являются узлы герметизации тэнов, выполненные с применением металлокерамического герметического ввода. Технология изготовления тэнов с герметическими вводами требует применения специального дорогостоящего оборудования и оснастки.

Контроль качества тэнов. Контроль в процессе производства осуществляется, как правило, на всех операциях. Основные ступени контроля:

- контроль чистоты поверхности трубы и нагревательного узла;

- контроль равномерности и плотности наполнения тэнов периклазом (производится выборочно);

- контроль электрической прочности изоляции тэнов после наполнения их периклазом. Проводится на пробойной установке испытанием на повышенное напряжение (до 3000 В), прикладываемое к нагревательному узлу и оболочке тэна (при этом же контроле косвенно проверяется несоосность расположения спирали и контактных стержней в трубе тэна);

- контроль линейных размеров тэнов после редуцирования и гибки (диаметр, длина и др.);

- контроль соосности нагревательного элемента тэнов и неравномерности шага витков спирали. Проводится, как правило, на рентгеновской установке на тэнах в прямом виде и обязательно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;

- контроль электрического сопротивления изоляции тэнов перед их герметизацией;

- выходной контроль (приемо-сдаточные испытания), определяемый конструкторской документацией (техническими условиями, стандартами). Перечень контролируемых параметров и процент выборки выходного контроля определяются конструкторской документацией. Перечень включает проверку электрического сопротивления, сопротивления изоляции, электрической прочности и мощности тэна, токов утечки в холодном и горячем состоянии, линейных размеров и допуски на них, герметичность оболочки и торцов тэнов и др.

Для повышения качества тэнов необходимо обеспечить квалифицированный входной контроль качества материалов и комплектующих изделий, в том числе:

- электросварных труб по плотности и прочности сварного шва, пластичности сварного шва и основного материала трубы, толщине стенки, диаметру эллипсности и др.;

электротехнического периклаза по химическому и зерновому составу, удельному объемному сопротивлению, электрической прочности, токам утечки, плотности утряски, влагопоглощению, наличию магнитных включений и др.;

сплавов высокого сопротивления по состоянию поверхности, разбросу значений удельного электрического сопротивления, качеству термообработки;

герметизирующих материалов по допустимому сроку хранения, вязкости и, в необходимых случаях, по адгезии и паропроницаемости;

концевых изоляторов по электрической прочности и водопоглощению.

Методы испытаний изложены в стандартах на указанные материалы.

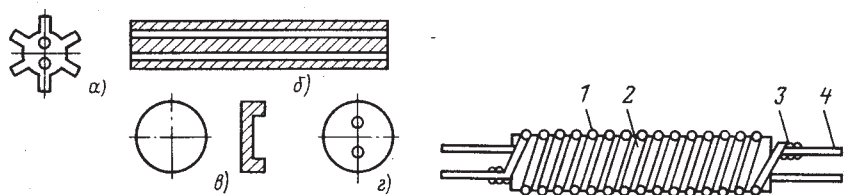
6. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПАТРОННЫХ И ПЛОСКИХ ТЭНОВ

Большинство технологических операций при изготовлении патронных и плоских тэнов существенно отличаются от технологии изготовления двухконцевых круглых тэнов. Ниже рассматриваются основные отличительные особенности изготовления таких нагревателей.

Изготовление патронных нагревателей связано с применением специальной электрокерамики, к которой предъявляются как требования, характерные для периклаза (высокие теплопроводность и электроизоляционные свойства, низкое влагопоглощение), так и дополнительные требования: механическая прочность, обеспечивающая возможность станочной плотной намотки спирали на керамику, и в то же время способность керамики рассыпаться в порошок при обжиге и удлинении тэна; минимальная кривизна керамики; гладкая поверхность — как наружная, так и внутри отверстий, в которых расположены контактные стержни.

Керамика имеет разновидности по назначению: рис. 30, а — звездочка центрирующая и распорная, устанавливаемая между последовательно соединенными керамическими стержнями (рис. 30, б) с намотанной на них нагревательной проволокой; рис. 30, в — задняя торцевая шайба, изолирующая спираль от соприкосновения с металлическим доньшком тэна и центрирующая керамический стержень; рис. 30, г — верхняя шайба.

Все указанные конструктивные исполнения керамики имеют разные размеры в зависимости от диаметра тэна, который меняется в диапазоне от 5 до 24 мм. Кроме того, керамика по всей ее номенклатуре изготавливается из двух различных по стойкости к температурным воздействиям материалов: для температуры на спирали до 600–700 °С — стеатит, для более высокой температуры (до 1200 °С) — на основе мелкого порошка периклаза. Изготовление керамики освоено Гжельским ПО "Электроизолятор".



Р и с. 30. Изоляторы для патронных тэнов

Р и с. 31. Нагревательный элемент для патронного тэна:

1 — спираль нагревательного элемента; 2 — керамика; 3 — место соединения спирали контактным стержнем; 4 — контактный стержень

Спираль наматывают на керамический стержень и концы спирали сразу же после намотки закрепляют к токоведущим стержням (рис. 31), выполненным из никелевой проволоки. Поэтому намоточная машина должна быть оснащена точным счетчиком витков. Желательно оснащение ее прибором для автоматического измерения электрического сопротивления спирали. Наполнение периклазом (между керамикой и трубой) производится на вибрационном столе (без направляющих трубок); нагревательный узел предварительно собирается и монтируется в трубу. Нагреватель опрессовывается на ротационно-ковочной машине.

Характерной операцией при изготовлении патронных нагревателей является обработка наружной поверхности оболочки на бесцентрошлифовальном станке, что необходимо для обеспечения монтажа нагревателя в посадочное отверстие нагреваемого изделия (штампы, пресс-формы, пуансоны и т.п.) с практически нулевым зазором, обеспечивающим минимальный перепад температуры между нагревателем и нагреваемым изделием. Соблюдение этого условия вызвано тем, что патронные нагреватели применяются, как правило, при высоких удельных поверхностных нагрузках, не допускающих воздушные зазоры, так как в этом случае резко возрастает температура на оболочке и спирали и сокращается во много раз срок службы нагревателя.

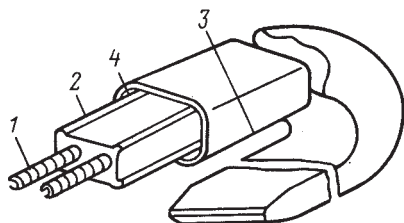
Изготовление плоских нагревателей. При изготовлении плоских нагревателей также применяют керамику (рис. 32). В отличие от патронных плоские нагреватели имеют относительно невысокую степень уплотнения периклаза, в связи с чем их применение ограничивается температурой на оболочке 400–500 °С.

Оболочку плоских нагревателей (заготовку) получают из трубы, придавая ей овальную форму пропусканием через вальцы.

После сборки оболочки с нагревательными спиралями и керамическими деталями нагреватели наполняют периклазом. Для этого пакет нагревателей устанавливают на вибростол и засыпают периклаз в каждый нагреватель через воронку.

Р и с. 32. Плоский тэн:

1 — спираль нагревательного элемента; 2 — керамика; 3 — оболочка нагревателя; 4 — зазор, засыпаемый периклазом



Уплотнение периклаза производится на прессе за счет дальнейшего плющения трубы; при большой длине нагревателя (до 6 м) операция уплотнения осуществляется участками по 600–800 мм последовательно по длине тэна.

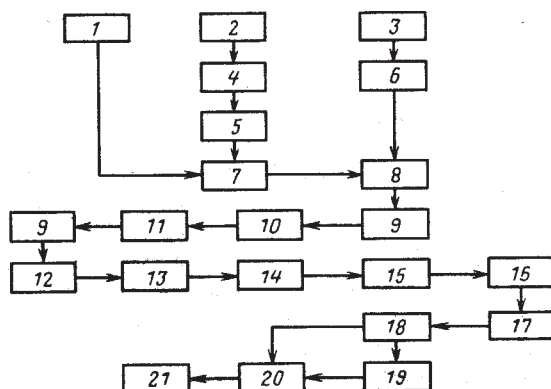
Качество герметизации плоского нагревателя (так же, как и патронного) значительно уступает по влагозащитным свойствам герметизации двухконцевых круглых нагревателей, что объясняется конструктивной особенностью этих тэнов. В случаях, требующих высоких значений электрического сопротивления, к плоским и патронным тэнам герметично приваривают на конце герметизирующие коробки, внутри которых осуществляется герметизация выводов по аналогии с герметизацией двухконцевых круглых тэнов.

7. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

Технологическая схема производства кабелей с минеральной изоляцией изображена на рис. 33. Как видно из приведенной схемы, при производстве кабелей с минеральной изоляцией имеется часть операций, общих с операциями, встречающимися при изготовлении тэнов. Это операции очистки заготовок, обработки электроизоляционного наполнителя, сборки заготовок, опрессовки, отжига, измерения и контроля электрических параметров готового изделия. Однако большинство типов оборудования, применяемого для изготовления кабелей, по своей конструкции существенно отличается от оборудования, применяемого для изготовления тэнов, так как кабели и тэны имеют большое различие по геометрическим параметрам и конструктивным элементам.

Технологический процесс начинается с подготовки материалов: трубы для оболочек, проволоки для токопроводящих жил и электроизоляционного наполнителя (на рис. 33 не показано). Трубы подвергают очистке — обезжириванию и обработке внутренней поверхности на дробеструйной установке. Очищают также заготовки, предназначенные для токопроводящих жил. Для нагревательных кабелей применяют трубы диаметром 10–25 мм с толщиной стенки 1–4 мм, длиной до 5 м [2]. Проволоку для токопроводящих жил, поступающую на завод в бухтах, выпрямляют на правильных станках и режут на мерные заготовки.

Электроизоляционный наполнитель перед заполнением оболочек прокаливают в электрической проходной печи при температуре 800–900 °С



Р и с. 33. Технологическая схема производства кабелей с минеральной изоляцией:

1 — заготовки труб; 2 — заготовки для токопроводящих жил; 3 — электроизоляционный наполнитель; 4 — правильная машина; 5 — отрезное устройство; 6 — электропечь для прокалки наполнителя; 7 — сборочный стол; 8 — наполнительная машина; 9 — ротационно-ковочная машина; 10 — цепной волоочильный стан; 11 — электропечь проходная для отжига кабеля; 12 — барабан однократного волочения; 13 — электропечь колпаковая для отжига кабеля в бухтах; 14 — бак с водой для контроля герметичности оболочки; 15 — устройство для отрезки и резделки концов кабеля; 16 — стенд для измерения электрического сопротивления теплопроводящих жил; 17 — стенд для контроля изоляции кабеля повышенным напряжением; 18 — стенд для измерения сопротивления изоляции; 19 — установка для наложения пластмассовой изоляции; 20 — место для упаковки бухт кабеля; 21 — склад готовых изделий

и засыпают в бункер, нагретый до 300–350 °С, после чего порошок проходит через магнитный сепаратор и с помощью вибронитателя заполняет свободное пространство оболочки.

Одним из наиболее распространенных способов заполнения оболочек является засыпка порошкообразным электроизоляционным материалом с одновременным уплотнением порошка направляющей, совершающей возвратно-поступательное перемещение внутри оболочки (рис. 34). При верхнем положении направляющей (рис. 34, б) порошок, проходя в зазоры между кондуктором и стенкой трубы, заполняет свободное пространство, после этого направляющая спрессовывает засыпанный порошок (рис. 34, а). После каждого цикла направляющая поднимается вверх на размер шага h . Путем регулирования подачи порошка, степени захвата направляющей пневматическими зажимами и частоты ее ударов устанавливают оптимальные значения скорости и плотности засыпки.

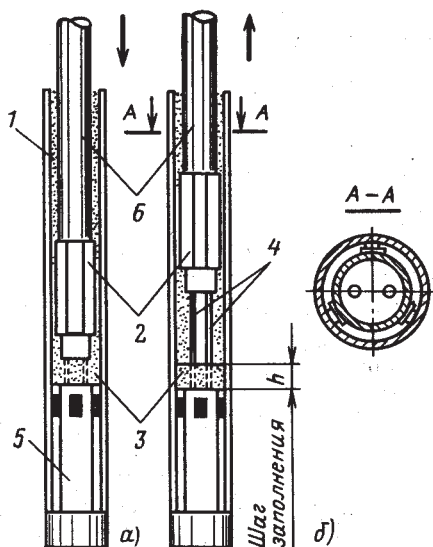
Один из концов заполненной электроизоляционным наполнителем заготовки опрессовывают на ротационно-ковочной машине, после чего проводят волочение заготовок на волоочильном стане. На одном из заводов при изготовлении кабелей с оболочкой из стали 12Х18Н10Т волочение осуществляют на цепном стане со скоростью $4,25 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$

Р и с. 34. Схема заполнения оболочки кабеля электроизоляционным наполнителем:

a — направляющая в опущенном положении; *б* — направляющая в поднятом положении (*1* — засыпка наполнителя; *2* — центрирующий наконечник; *3* — уплотненный наполнитель; *4* — токопроводящие жилы; *5* — фиксатор; *б* — направляющая)

(диаметр заготовки оболочки 20 мм, толщина стенки 2 мм). Например, для изготовления кабеля диаметром 6 мм заготовку пропускают последовательно через 10 фильер (диаметры фильер соответственно 16,5; 14,9; 13,3 мм и т.д.). После прохода через каждую фильер заготовку отжигают при температуре 1000 °С и конец кабеля опрессовывают в ротационно-ковочной машине. Волочение заготовки на волочильном стане осуществляют до тех пор, пока ее длина не достигнет рабочей длины волочильного стана, после чего заготовка поступает на барабаны однократного волочения. Снятые с барабанов однократного волочения бухты кабеля отжигают в колпаковой печи, отжиг производят в среде защитного газа.

Процесс изготовления кабеля заканчивается, как только заготовка достигнет необходимого диаметра. Бухту кабеля выдерживают в воде 8–12 ч, после чего отрезают увлажнившиеся концы и проводят испытания кабеля — измеряют электрическое сопротивление токопроводящих жил и сопротивление изоляции, испытывают повышенным напряжением.



Глава третья

МЕТОД РАСЧЕТА ТЭНОВ. ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ

8. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА

Надежность тэнов и нагревательных кабелей, работающих в определенных условиях, во многом зависит от их конструктивных особенностей. В этой связи при создании новых нагревателей задачей расчета является определение рациональных значений параметров всех основных элементов, обеспечивающих работу тэнов в заданном режиме.

При выборе серийно выпускаемых нагревателей для того или иного объекта в задачу расчета входит определение допустимости и целесообразности применения нагревателей с известными конструктивными параметрами для работы в заданных эксплуатационных условиях с учетом требований, предъявляемых к их надежности.

При расчете нагревателей температура их оболочки может входить в число исходных данных. Однако обычно значение этого параметра не задается, а подлежит определению в зависимости от условий, связанных с особенностями конструкции и режимами работы установки, в состав которой входят нагреватели. Методы расчета температуры оболочки нагревателей изложены в гл. 4.

9. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРУБЧАТОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

При построении математической модели тэнов рассмотрим наиболее широко распространенный тип тэнов, имеющих круглое поперечное сечение и центрально расположенный нагревательный элемент, выполненный в виде проволоочной спирали.

При создании тэна определяющими факторами являются температура нагревательного элемента и электрическое сопротивление изоляции нагревателя.

Расчет этих параметров затруднен следующими обстоятельствами:

а) нагревательный элемент тэнов обычно изготавливается в виде проволоочной цилиндрической спирали;

б) при работе нагревателя температура слоя наполнителя, отделяющего нагревательный элемент от трубчатой оболочки, не одинакова по сечению, а следовательно, переменны по радиусу тэнов такие свойства этого слоя, как электрическая проводимость и теплопроводность.

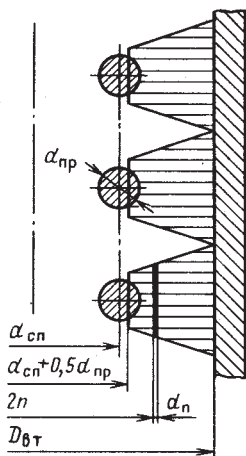
В качестве основы для построения математической модели работы нагревателя положены известные формулы, применяемые при теплотехнических расчетах и расчетах сопротивления изоляции трубчатых образцов:

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{т}} + \frac{P}{2 \pi \lambda L_{\text{а}}} \ln \frac{D_{\text{вт}}}{d_{\text{э}}}; \quad (6)$$

$$R_{\text{из}} = \frac{\rho_{\text{э}}}{2 \pi L} \ln \frac{D_{\text{вт}}}{d_{\text{сп}}}, \quad (7)$$

где P — мощность тэна; $L_{\text{а}}$ — активная длина тэна; $D_{\text{вт}}$ — внутренний диаметр оболочки тэна; $d_{\text{э}}$ — эквивалентный диаметр спирали, равный диаметру такого цилиндрического стержня, тепловой поток от которого, при прочих одинаковых условиях, был бы равен тепловому потоку от нагревательного элемента; $\rho_{\text{э}}$ — эквивалентное удельное объемное со-

Р и с. 35. Схема рабочей зоны трубчатого электронагревателя



противление наполнителя, при котором ток утечки равнялся бы току утечки при фактически изменяющемся по радиусу тэна значении ρ .

При определении эквивалентного диаметра спирали тэнов были сделаны следующие допущения:

виток нагревательного элемента имеет не спиральную, а кольцевую форму;

теплоотдающая поверхность витка имеет форму цилиндра с длиной образующей, равной полупериметру сечения проволоки;

с целью снижения погрешностей, вызываемых предыдущими допущениями, диаметр кольцевой теплоотдающей поверхности равен $d_{сп} + 0,5d_{пр}$, где $d_{сп}$ — диаметр витка спирали по средней линии;

коэффициент теплопроводности наполнителя имеет постоянное значение по радиусу тэна.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что указанные допущения вполне приемлемы при условиях $1,5 \leq K = h/d_{пр} \leq 5$ и $D_{вт} - d_{сп} \geq h$, т.е. во всем диапазоне наиболее распространенных соотношений геометрических параметров основных элементов тэнов (h — шаг витков спирали).

На рис. 35 представлен участок тэна между витками спирали и оболочкой. Выделив в зоне теплопереноса от спирали к оболочке цилиндрический слой элементарной толщины dn с произвольным радиусом n (на рис. 35 зачерненный участок), можно определить проходящий через него тепловой поток:

$$Q = -S \lambda dt/dn, \quad (8)$$

где S — площадь цилиндрической поверхности выделенного слоя; dt/dn — градиент температуры.

Площадь выделенного слоя может быть выражена через геометрические размеры тэна и независимую переменную n . Для одного витка

$$S_v = \frac{2\pi}{D_{вт} - d_{сп} - 0,5d_{пр}} \{ n^2 (2h - \pi d_{пр}) + n [0,5\pi d_{пр} D_{вт} - h (d_{сп} + 0,5d_{пр})] \}.$$

Подставляя значение S_v в (8) и интегрируя выражение с учетом граничных условий [при $n = 0,5(d_{сп} + 0,5d_{пр})$ $t = t_{сп}$, при $n = 0,5D_{вт}$ $t = t_t$].

можно определить тепловой поток, генерируемый одним витком нагревательного элемента:

$$Q_B = \frac{2\pi\lambda [0,5\pi d_{\text{пр}} D_{\text{вт}} - h(d_{\text{сп}} + 0,5d_{\text{пр}})](t_{\text{сп}} - t_{\text{т}})}{(D_{\text{вт}} - d_{\text{сп}} - 0,5d_{\text{пр}}) \ln \frac{0,5\pi d_{\text{пр}} D_{\text{вт}}}{h(d_{\text{сп}} + 0,5d_{\text{пр}})}} \quad (9)$$

Тепловой поток, отдаваемый цилиндрическим стержнем на участке, равном шагу спирали, определяется из известного выражения

$$Q_h = \frac{2\pi\lambda h(t_{\text{сп}} - t_{\text{т}})}{\ln(D_{\text{вт}}/d_3)} \quad (10)$$

По принятому определению эквивалентного диаметра спирали d_3

$$Q_B = Q_h, \quad (11)$$

поэтому совместное решение (9)–(11) относительно d_3 позволяет получить выражение для определения эквивалентного диаметра спирали тэна при теплотехнических расчетах:

$$d_3 = D_{\text{вт}} \left[\frac{0,5\pi D_{\text{вт}} d_{\text{пр}}}{h(d_{\text{сп}} + 0,5d_{\text{пр}})} \right] \frac{h(D_{\text{вт}} - d_{\text{сп}} - 0,5d_{\text{пр}})}{h(d_{\text{сп}} + 0,5d_{\text{пр}}) 0,5\pi D_{\text{вт}} d_{\text{пр}}} \quad (12)$$

В результате анализа степени влияния на размер эквивалентного диаметра различных параметров спирали, входящих в правую часть этого выражения, в ряде случаев допустима его замена приближенным уравнением, несущественно снижающим точность вычислений при практически возможных вариациях основных параметров, но более удобным для использования:

$$d_3 \approx D_{\text{вт}} \left(\frac{2D_{\text{вт}}}{Kd_{\text{сп}}} \right) \frac{K(D_{\text{вт}} - d_{\text{сп}})}{Kd_{\text{сп}} - 2D_{\text{вт}}} \quad (13)$$

При определении эквивалентного удельного сопротивления наполнителя было принято, что нагревательный элемент имеет форму цилиндрического стержня с диаметром сечения, равным среднему диаметру витков спирали. Это допущение оправдано, поскольку удельная объемная электрическая проводимость периклаза резко меняется с изменением температуры и в слоях, расположенных вблизи от нагревательного элемента, может быть на несколько порядков выше, чем в слоях, прилегающих к оболочке. Следовательно, на общее значение сопротивления

изоляции, зависящее в основном от сопротивления менее нагретых слоев наполнителя, коэффициент шага спирали и диаметр проволоки при прочих равных условиях не окажут существенного влияния.

При реально возможных значениях температурного перепада в слое наполнителя зависимость локальных значений удельного электрического сопротивления от температуры может быть описана уравнением

$$\rho_{из} = ba^t, \quad (14)$$

где t — температура, °C; a, b — постоянные, значения которых зависят от качества периклаза.

Значения постоянных a и b в зависимости от класса периклаза (ГОСТ 13236-83) следующие:

Класс периклаза	 a	b , Ом · м
Высший	 0,985	$8,0 \cdot 10^{11}$
I	 0,986	$1,6 \cdot 10^{11}$
II	 0,987	$2,7 \cdot 10^{10}$
III	 0,988	$3,0 \cdot 10^9$

Электрическое сопротивление любого произвольно взятого трубчатого цилиндрического слоя наполнителя элементарной толщины dn , соосного с нагревателем и имеющего диаметр $2n > d_{сп}$, определяется из уравнения

$$dR_{из} = \frac{ba^{t_n}}{2\pi L n} dn, \quad (15)$$

где t_n — температура рассматриваемого слоя.

Полное электрическое сопротивление изоляции тэна будет равно сумме сопротивлений всех элементарных слоев в пределах от $0,5d_{сп}$ до $0,5D_{вт}$:

$$R_{из} = \frac{b}{2\pi L} \int_{0,5d_{сп}}^{0,5D_{вт}} \frac{a^{t_n}}{n} dn. \quad (16)$$

Заменив переменную t_n ее выражением по известной формуле

$$t_n = t_{сп} - \frac{t_{сп} - t_T}{\ln \frac{D_{вт}}{d_3}} \ln \frac{2n}{d_3} \quad (17)$$

и выполнив интегрирование, получим:

$$R_{из} = \frac{b(a^{t_{сп}} - a^{t_T}) \ln(D_{вт}/d_3)}{2\pi L (t_{сп} - t_T) \ln a}. \quad (18)$$

Совместное решение (7) и (18) дает:

$$\rho_3 = \frac{b(a^{t_{\text{сп}}} - a^{t_T})}{(t_{\text{сп}} - t_T) \ln a} \quad (19)$$

Система четырех уравнений (6), (7), (12) и (17) является математической моделью нагревателя, которая отражает зависимость параметров, характеризующих его работоспособность ($t_{\text{сп}}$ и $R_{\text{из}}$), от геометрических размеров его функциональных элементов ($D_{\text{вт}}$; L ; L_a ; $d_{\text{сп}}$; $d_{\text{пр}}$; h), класса периклаза (постоянных a и b) и условий эксплуатации (t_T ; P).

При проектировании нагревателя приходится решать обратную задачу: при заданных или предварительно рассчитанных предельно допустимых значениях $t_{\text{сп}}$ (доп) и $R_{\text{из}}$ (доп), а также $D_{\text{вт}}$, L , L_a , t_T и P определять наиболее рациональные геометрические размеры нагревательного элемента, т.е. $d_{\text{сп}}$, $d_{\text{пр}}$ и h . При этом указанная система уравнений недостаточна для определения неизвестных.

Выражая в известном уравнении

$$P = U^2 / R_a \quad (20)$$

значение R_a — электрическое сопротивление тэна — через удельное объемное сопротивление ρ_a , после преобразования получаем:

$$\frac{\sqrt{d_{\text{сп}}^2 + h^2 / \pi^2}}{h d_{\text{пр}}^2} = \frac{U^2}{4 \rho_a L_a P} \quad (21)$$

Тогда модель будет состоять из пяти уравнений при общем количестве неизвестных, равном пяти ($d_{\text{сп}}$; $d_{\text{пр}}$; h ; $d_{\text{сп},3}$; ρ_3).

Для инженерного расчета геометрических размеров спиралей (21) может быть приближенно выражено:

$$d_{\text{сп}} / h d_{\text{пр}}^2 \approx U^2 / 4 \rho_a L_a P \quad (22)$$

Значение ошибки, связанной с таким упрощением, во много раз меньше естественного разброса значений ρ_a , и ею можно пренебречь.

Так как при расчете задаются предельные значения температуры спирали и сопротивления изоляции, то в результате решения системы уравнений могут быть определены лишь граничные значения диаметра спирали: минимальный диаметр $d_{\text{сп} \min}$, уменьшение которого приведет к нагреву материала спирали сверх допустимой температуры, и максимальный диаметр $d_{\text{сп} \max}$, увеличение которого приведет к недопустимому снижению сопротивления изоляции.

На основании приведенной математической модели построен метод расчета тэнов, описание которого приводится ниже.

При разработке метода учитывалось, что создаваемый тэн должен

быть достаточно технологичен в изготовлении, в связи с чем при проведении расчетов был предусмотрен ряд ограничений по диаметру проволоки, отношению диаметра спирали к диаметру проволоки и др.

Для удобства проведения расчетов дополнительно было введено понятие эквивалентной температуры $t_э$, т.е. такой условной температуры, при равномерном нагреве до которой всей массы наполнителя его электрическое сопротивление равнялось бы действительному сопротивлению изоляции работающего тэна.

Из (14) и (17) определяется:

$$t_э = \frac{\ln \frac{a^{t_{сп}} - a^{t_T}}{(t_{сп} - t_T) \ln a}}{\ln a} \quad (23)$$

10. МЕТОД РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЭНА

Метод разработан для расчета тэнов с нагревательным элементом, выполненным в виде проволочной цилиндрической спирали из сплава высокого сопротивления расположенной соосно с оболочкой, в которых в качестве наполнителя применяется электротехнический периклаз, опрессовываемый по технологии, принятой на отечественных заводах (с плотностью до $2900 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$).

Конкретными задачами расчета являются определение конструктивных параметров спирали сопротивления (среднего диаметра спирали; диаметра оправки, служащей для ее навивки; количества витков активной части; диаметра проволоки; коэффициента шага витков) и марки периклаза, который рационально использовать в качестве наполнителя.

Исходными данными при проведении расчета являются:

- 1) мощность тэна в рабочем режиме P ;
- 2) электрическое напряжение на контактных стержнях U ;
- 3) развернутая длина тэна L ;
- 4) длина контактных стержней в заделке L_K ;
- 5) наружный диаметр оболочки тэна D ;
- 6) температура нагрева оболочки t_T ;
- 7) толщина стенки оболочки s ;
- 8) допустимая температура нагрева спирали $t_{сп, доп}$;
- 9) материал проволоки спирали;
- 10) допустимое электрическое сопротивление изоляции в рабочем режиме тэна $R_{из, доп}$.

Данные 1–6 выбирают в соответствии с конструктивными особенностями установки, в которой предполагается использование нагревателя, и условиями ее работы. Рекомендации по выбору значений этих параметров изложены в гл. 4.

Выбор толщины стенки оболочки тэна (параметр 7) осуществляют, ориентируясь на следующие рекомендации: при диаметре оболочки 6–8 мм s принимают равным 0,6 мм, при диаметре оболочки 8–10 мм – равным 0,8 мм и при диаметре свыше 10 мм – равным 1 мм.

Данные 8–10 выбирают на основании требований, предъявляемых к надежности тэна. При этом значение $R_{из, доп}$ только приблизительно характеризует надежность тэна, так как не учитывается влияние различных классов герметиков, количества и значения радиусовгиба тэнов, степени очистки внутренней поверхности трубы и нагревательного элемента от органических примесей и ряда других технологических факторов, влияющих в той или иной степени на реальное значение сопротивления изоляции нагревателя. При одинаковых условиях технологии изготовления однотипных нагревателей учет $R_{из, доп}$ позволяет рассчитать рациональные значения конструктивных параметров тэна, обеспечивающих требуемый уровень его сопротивления изоляции в рабочем режиме. Для большинства типоразмеров тэнов общего назначения рекомендуется принимать постоянное значение $R_{из, доп}$, равное $1,5 \cdot 10^6$ Ом. При расчете тэнов специального назначения, к которым предъявляют, как правило, повышенные требования по их электроизоляционным характеристикам, значение $R_{из, доп}$ принимают, исходя из конкретных требований.

Материал проволоки для тэнов общего и бытового назначения выбирают по рекомендациям, приведенным в § 3.

Значение $t_{сп, доп}$ для большинства серийно выпускаемых тэнов бытового и общего назначения рекомендуется принимать равным 0,8 от максимальных рабочих температур, приведенных в табл. 10. Для тэнов с повышенными требованиями по надежности значения $t_{сп, доп}$ следует снижать в зависимости от конкретных требований. Так, для часто используемой в тэнах проволоки из сплава Х20Н80-Н допустимую температуру спирали при диаметре проволоки 0,2 мм следует принимать равной 760 °С, при диаметре проволоки 0,4 мм 800 °С, при диаметре проволоки 1 мм 880 °С.

Заданные или выбранные при конструировании электротермических установок с тэнами исходные данные (P , U , L , L_K , D , t_T , s , $t_{сп, доп}$, $R_{из, доп}$, материал проволоки спирали) позволяют получить дополнительные параметры, необходимые для расчета тэнов.

длину активной части тэна, м:

$$L_a = L - 2L_K; \quad (24)$$

внутренний диаметр оболочки, м:

$$D_{вт} = D - 2s; \quad (25)$$

удельную мощность тэна, Вт/м:

$$P_L = P/L_a; \quad (26)$$

допустимый температурный перепад между спиралью и оболочкой тэна, °С:

$$\Delta t_{\text{доп}} = t_{\text{сп,доп}} - t_{\text{т}}. \quad (27)$$

Учитывая, что сопротивление изоляции тэна обратно пропорционально его длине, допустимое сопротивление изоляции 1 м тэна, Ом·м, определяют по формуле

$$R_{\text{из,доп,л}} = LR_{\text{из,доп}}. \quad (28)$$

Для выбора класса периклаза, обеспечивающего требуемые электроизоляционные характеристики нагревателя, необходимо определить эквивалентную температуру наполнителя тэна при работе в расчетном режиме. Из (23) следует, что эквивалентная температура наполнителя во многом зависит от температуры спирали, т.е. от параметра, значение которого на данном этапе расчетов неизвестно. Эквивалентная температура может быть выражена также через температуру оболочки, °С:

$$t_{\text{э}} = t_{\text{т}} + \eta, \quad (29)$$

где η — температурная поправка, характеризующая превышение эквивалентной температуры по сравнению с температурой оболочки.

Так как $t_{\text{т}}$ при расчетах тэнов — величина известная, то, зная η , легко определить и $t_{\text{э}}$.

В соответствии с (23) поправка η может быть представлена зависимостью

$$\eta = f [a; (t_{\text{сп}} - t_{\text{т}})].$$

Известно, что

$$(t_{\text{сп}} - t_{\text{т}}) = \varphi (P_L; D_{\text{вт}}/d_{\text{э}}).$$

Тогда

$$\eta = f [a; \varphi (P_L; D_{\text{вт}}/d_{\text{э}})].$$

Эта функциональная зависимость раскрыта графоаналитическим методом и представлена в виде диаграммы на рис. 36 для периклаза II класса.

Ориентировочные значения η в зависимости от удельной мощности тэна даны в табл. 12.

Исходные и полученные дополнительные данные позволяют определить наименьший эквивалентный диаметр спирали, при котором ее температура не превышает допустимого значения, и наибольший диаметр спирали, при котором расчетное электрическое сопротивление изоляции тэна не будет ниже заданного.

Т а б л и ц а 12. Ориентировочные значения η в зависимости от удельной мощности тэна P_L

P_L , Вт/м	η , °С	P_L , Вт/м	η , °С	P_L , Вт/м	η , °С
200	10	1000	50	3000	105
300	15	1200	60	3600	110
400	20	1500	70	4000	115
500	25	1800	80	5000	120
600	30	2000	85	6000	125
800	40	2500	95	8000	130

Из (6) следует:

$$d_{\text{э min}} = \frac{D_{\text{вт}}}{e^{\pi \lambda \Delta t_{\text{доп}} / P_L}} \quad (30)$$

Из (7), (14) и (18) следует:

$$d_{\text{сп max}} = \frac{D_{\text{вт}}}{e^{2\pi E_{\text{доп}} / b a^{\text{тэ}}}} \quad (31)$$

Для удобства нахождения значений $d_{\text{э min}}$ и $d_{\text{сп max}}$ на основании этих выражений разработана расчетная номограмма, приведенная в прилож. 1 (см. рис. П.2).

В верхней части номограммы размещена шкала Δt , в нижней — шкала $R_{\text{из,л}}$. Вертикальная сетка линий соответствует постоянным значениям этих параметров. Горизонтальные линии — постоянные значения: $Z = D_{\text{вт}} / \bar{d}_{\text{э}}$ или $Z = D_{\text{вт}} / d_{\text{сп}}$. Шкала Z размещена в правой части номограммы.

Кроме того, на номограмме нанесена сетка линий, соответствующих постоянным значениям P_L и $t_{\text{э}}$.

Схема пользования номограммой показана на рис. 37.

Из точки A , абсцисса которой равна вычисленному значению $R_{\text{из,л}}$, проводят вертикаль до пересечения с продолжением наклонной линии $t_{\text{э}}$ для выбранного класса периклаза (точка f'), ордината которой F' по шкале Z равна отношению $D_{\text{вт}} / d_{\text{сп max}}$. Отсюда рассчитывают максимально допустимый диаметр витков спирали:

$$d_{\text{сп max}} = D_{\text{вт}} / Z_1 \quad (32)$$

Если Z_1 меньше 1,4, т.е. выходит за пределы шкалы, максимально допустимый диаметр витков можно принять равным $0,75 D_{\text{вт}}$. Для нахождения $d_{\text{э min}}$ на пересечении вертикали с абсциссой в точке C , равной по шкале Δt допустимому значению температурного перепада между спиралью и оболочкой, и наклонной линии, соответствующей по шка-

соблюдается указанное условие. При возможности использования периклаза нескольких классов для тэнов общего назначения целесообразно выбирать низший из них, как имеющий меньшую стоимость. Если для всех классов периклаза значения $d_{\text{сп max}}$ будут меньше значений $d_{\text{сп min}}$, то создание тэна с заданными параметрами невозможно.

В соответствии с найденными значениями $d_{\text{сп max}}$ (для выбранного класса периклаза) и $d_{\text{сп min}}$ желательный диаметр витков спирали определяют по выражению

$$d'_{\text{сп}} = 0,5 [d_{\text{сп min}} + d_{\text{сп max}}], \quad (35)$$

так как при этом обеспечивается достаточный запас и по температуре нагревательного элемента и по уровню электроизоляции тэна. Окончательно полученное значение диаметра спирали проверяется по минимально допустимому расстоянию между наружным диаметром спирали и внутренним диаметром оболочки, которое должно быть не менее 1,0 мм. Для навивки спирали обычно используют проволоку диаметром от 0,2 до 1,2 мм.

Навитая спираль должна быть достаточно жесткой, так как иначе ее осевое провисание при монтаже в трубчатой оболочке может существенно отразиться на равномерности шага витков. Жесткость спирали уменьшается по мере возрастания отношения $d_{\text{сп}}/d_{\text{пр}}$. Практика показала, что диаметр спирали не должен более чем в 9 раз превосходить диаметр проволоки для обеспечения достаточной жесткости, однако при этом не рекомендуется осуществлять навивку проволоки на оправку с диаметром меньшим чем $5d_{\text{пр}}$ из-за возможного механического повреждения проволоки.

Указанные условия необходимо учитывать при окончательном выборе диаметра проволоки для изготовления нагревательного элемента, м:

$$d'_{\text{сп}}/9 \leq d_{\text{пр}} \leq d'_{\text{сп}}/5; \quad (36)$$

$$0,2 \cdot 10^{-3} \leq d_{\text{пр}} \leq 1,2 \cdot 10^{-3}. \quad (37)$$

В особых случаях диапазон выбора диаметров проволоки допустимо расширить:

$$d'_{\text{сп}}/12 \leq d_{\text{пр}} \leq d'_{\text{сп}}/4;$$

$$0,14 \cdot 10^{-3} \leq d_{\text{пр}} \leq 1,6 \cdot 10^{-3}.$$

При этом может возникнуть необходимость применения специальных технологических приемов по изготовлению спирали и увеличению ее жесткости.

Спираль должна обеспечивать заданную мощность. Условие выполнения этого требования описывается (22). Правая часть этого уравнения является определяющим параметром нагревательного элемента, так

как она целиком зависит от исходных данных, и на ее значение не оказывают влияния выбираемые при расчете значения отдельных параметров спирали. Для удобства расчета принимается, м^{-2} :

$$U^2 / 4\rho_a L_a P = G, \quad (38)$$

где ρ_a — расчетное значение удельного электрического сопротивления материала спирали при работе тэна, $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Значение ρ_a отличается от значения удельного электрического сопротивления материала проволоки в состоянии поставки. Это отличие вызывается тем, что, во-первых, опрессовка заготовки нагревателя сопровождается снижением электрического сопротивления спирали на 20—24 % из-за деформации проволоки; во-вторых, при увеличении температуры спирали ее электрическое сопротивление в зависимости от материала проволоки и от степени повышения температуры возрастает на 1—10 %; в-третьих, при работе тэна материал проволоки подвергается термическому отжигу, что сопровождается для никельхромовых сплавов повышением электрического сопротивления на 3—5 %, а для железохромоалюминиевых сплавов его понижением приблизительно на 4 %. При редуцировании заготовки диаметр проволоки несколько изменяется, следовательно, изменяется и площадь ее поперечного сечения. Однако при всех расчетах, выполняемых по этому методу, диаметр проволоки принимается равным первоначальному.

Для корректировки расчета, вызванной влиянием вышеперечисленных факторов, принимаются расчетные значения удельного электрического сопротивления, которые отличаются от фактических

Расчетные значения ρ_a для основных материалов, которые могут быть использованы при изготовлении спиралей тэнов, $10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$:

X20H80-H	8,8
X15H60-H	9,3
X23Ю5Т; X27Ю5Т	10,7

Используя (22), введем понятия определяющего параметра нагревательного элемента G :

$$d_{\text{сп}} / (K d_{\text{пр}}^3) = G, \quad (39)$$

где $K = h/d_{\text{пр}}$ — коэффициент шага спирали. Это уравнение позволяет определить, сообразуясь с ранее полученными данными, все возможные варианты конструктивного исполнения нагревательного элемента.

На основании этого уравнения для удобства проведения поиска, разработана номограмма (см. рис. П.3). Горизонтальная сетка линий соответствует постоянным значениям G и K . Вертикальная сетка линий имеет вспомогательное значение. Кроме того, на номограмме нанесена серия ломаных линий $d_{\text{сп}} = \text{const}$ и серия линий $d_{\text{пр}} = \text{const}$. Шкала $d_{\text{пр}}$ соответствует сортаменту проволок из сплавов с высоким сопро-



Схема пользования номограммой показана на рис. 38.

Учитывая, что коэффициент шага спирали целесообразно применять от 1,5 до 5, следует выбирать диаметры проволоки в диапазоне пересечения линий ab с линиями $d_{\text{пр}} = \text{const}$ в пределах ординат от $K = 1,5$ до $K = 5$, т.е. в рассмотренном на рис. 38 примере от $d'_{\text{пр}}$ до $d''_{\text{пр}}$.

Если сопоставляемые диапазоны не имеют общих значений, то следует проверить возможность применения спирали с диаметром, отличным от определенного по (35), но не выходящим за пределы $d_{\text{сп min}}$ и $d_{\text{сп max}}$. В отдельных случаях верхний предел диапазона может быть

повышен в предположении использования периклаза более высокого класса, чем это предусматривалось ранее.

Если наименьший диаметр проволоки, допустимый в соответствии с номограммой, больше максимального значения, определенного по (36) и (37), то иногда возможно создание тэна с двухзаходной спиралью. В этом случае значение G , полученное по (38), и допустимые пределы изменения K увеличиваются в 2 раза. Тогда по номограмме (см. рис. 38) на линии $d'_{\text{сп}}$ находят точку φ с ординатой $2A$ по шкале G , а диаметр проволоки выбирают в диапазоне пересечения вертикали $a'b'$, проходящей через эту точку, с линиями $d_{\text{пр}} = \text{const}$ в пределах ординат от $K = 3$ до $K = 10$, т.е. в рассматриваемом примере от $d_{\text{пр}}(2)$ до $d''_{\text{пр}}(2)$.

Если в результате расчета оказывается возможным применение проволоки различных диаметров, то выбор диаметра проволоки проводят, округляя среднеарифметическое значение $d_{\text{пр max}}$ и $d_{\text{пр min}}$ в пределах допустимых значений K до ближайшего в сортаменте диаметра проволоки.

При определении диаметра оправки для навивки спирали следует учитывать, что за счет упругости проволоки диаметр спирали после навивки увеличивается до 7 %, а в результате опрессовки заготовки уменьшается приблизительно на 16 %. Диаметр оправки рассчитывают по приближенной формуле

$$d'_{\text{опр}} \approx 1,1d'_{\text{сп}} - d_{\text{пр}}, \quad (40)$$

округляя полученное значение до ближайшего из следующего ряда (10^{-3} м): 1,0; 1,1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,6; 6,0.

Приведенный ряд распространяется как на тэны общего и бытового, так и на тэны специального назначения, в том числе по разовым заказам.

Расчетное значение среднего диаметра, m , спирали в готовом тэне находят из выражения

$$d_{\text{сп}} = (d_{\text{опр}} + d_{\text{пр}})/1,1. \quad (41)$$

После окончательного выбора диаметров спирали и проволоки, из которой она навита, по номограмме $K = f(G, d_{\text{сп}}, d_{\text{пр}})$ (рис. 38) находят значение коэффициента шага витков K , а затем значение шага спирали:

$$h = Kd_{\text{пр}}. \quad (42)$$

Количество витков активной части спирали определяют так:

$$n_a = L_a/h. \quad (43)$$

Полученное количество витков n_a является расчетным значением и в ряде случаев отличается от получаемых при изготовлении тэна.

Это объясняется тем, что диаметр проволоки и удельное электрическое сопротивление материала могут иметь отклонения от номинальных значений. В связи с этим в некоторых случаях электрическое сопротивление активной части спирали подлежит уточнению при изготовлении опытных образцов каждого вновь осваиваемого типоразмера тэна.

Для окончательного с учетом гранулометрического состава выбора марки периклаза большое значение имеет размер зазора b_3 между витками спирали в период заполнения заготовки наполнителем. Если $b_3 \geq 0,65 \cdot 10^{-3}$ м, то предусматривают применение крупнозернистого периклаза; если $0,40 \cdot 10^{-3} \geq b_3 < 0,65 \cdot 10^{-3}$ м, то используют мелкозернистый периклаз.

При $b_3 < 0,40 \cdot 10^{-3}$ м расчеты корректируют, начиная с выбора диаметра проволоки, уменьшают его значение, если это возможно, до ближайшего по сортаменту.

При определении размера зазора b_3 необходимо учитывать растяжение спирали при редуцировании. С достаточной для практики точностью значение b_3 может быть определено по выражению:

$$b_3 = h/1,15 - d_{\text{пр}}. \quad (44)$$

Пример 1. Расчет основных конструктивных параметров тэна.

Необходимо спроектировать тэн со следующими основными параметрами:

$$P = 2000 \text{ Вт}; \quad U = 220 \text{ В}; \quad L = 0,8 \text{ м}; \quad L_K = 0,04 \text{ м};$$

$$D = 0,013 \text{ м}; \quad s = 0,001 \text{ м}; \quad t_T = 400^\circ \text{С}; \quad t_{\text{сп,доп}} = 850^\circ \text{С};$$

$$R_{\text{из,доп}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Ом};$$

Материал проволоки для навивки спирали сопротивления — сплав марки Х20Н80-Н.

Требуется определить рациональные значения параметров и марку периклаза.

Расчет

1. По (24)

$$L_a = 0,80 - 2 \cdot 0,04 = 0,72 \text{ м.}$$

2. По (25)

$$D_{\text{вт}} = 0,013 - 2 \cdot 0,001 = 0,011 \text{ м.}$$

3. По (26)

$$P_L = 2000 : 0,72 = 2778 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}.$$

4. По (27)

$$\Delta t_{\text{доп}} = 850 - 400 = 450^\circ \text{С.}$$

5. По (28)

$$R_{\text{из,доп,л}} = 0,8 \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

6. По табл. 12

$$\eta \approx 100^\circ \text{C, тогда по (29)}$$

$$t_3 = 400 + 100 = 500^\circ \text{C.}$$

7. По номограмме (см. рис. П.2) при $R_{\text{из,доп,л}} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $t_3 = 500^\circ \text{C}$ для периклаза I класса $Z_1 < 1,4$, для периклаза II класса $Z_1 \approx 1,76$ и для периклаза III класса $Z_1 \approx 14$.

8. По (32) и в соответствии с пояснением к ней для периклаза I класса $d_{\text{сп max}} = 0,75 \cdot 0,011 = 0,00825 \text{ м}$; для периклаза II класса $d_{\text{сп max}} = 0,011 : 1,76 = 0,00625 \text{ м}$; для периклаза III класса $d_{\text{сп max}} = 0,011 : 14 \approx 0,00078 \text{ м}$.

9. По номограмме (см. рис. П.2) при $\Delta t_{\text{доп}} = 450^\circ \text{C}$ и $P_L = 2778 \text{ Вт/м}$ $Z_2 = 8,2$.

10. По (33)

$$d_{\text{э min}} = 0,011 : 8,2 \approx 0,00134 \text{ м.}$$

11. По (34)

$$d_{\text{сп min}} = 1,5 \cdot 0,00134 = 0,00201 \text{ м.}$$

12. Сопоставляя результаты по пунктам 8 и 11, выбирают периклаз II класса, так как периклаз III класса в данном случае не отвечает условиям расчета. Для выбранного класса периклаза $d_{\text{сп max}} = 0,00625 \text{ м}$ больше $d_{\text{сп min}} = 0,00201 \text{ м}$.

13. По (35)

$$d'_{\text{сп}} = 0,5(0,00201 + 0,00625) = 0,00413 \text{ м.}$$

14. По (36)

$$0,00413 : 9 \approx 0,00046 \text{ м} \leq d'_{\text{пр}} \leq 0,00413 : 5 \approx 0,00083 \text{ м.}$$

По (36) и (37)

$$d'_{\text{пр}} = 0,00046 \div 0,00083 \text{ м.}$$

15. Для сплава Х20Н80-Н (см. с. 77)

$$\rho_a = 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

16. По (38)

$$G = \frac{220^2}{4 \cdot 8,8 \cdot 10^{-7} \cdot 0,72 \cdot 2000} \approx 9,55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}.$$

17. По номограмме (см. рис. П.3) для $G = 9,55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$ и $d'_{\text{сп}} = 0,00413 \text{ м}$ в пределах изменения K от 1,5 до 5 $d'_{\text{пр}} \approx 0,00044 \div 0,00065 \text{ м}$.

18. Сопоставляя результаты по п.п. 14 и 17, определяют $d_{\text{пр}} = 0,00046 \div 0,00065 \text{ м}$.

19. Рассчитывают среднеарифметическое значение $\bar{d}_{\text{пр}}$:

$$\bar{d}_{\text{пр}} = 0,5 (0,00046 + 0,00065) = 0,000555 \text{ м}$$

и из ряда диаметров проволоки, выпускаемой промышленностью, выбирают ближайший $d_{\text{пр}} = 0,00056 \text{ м}$.

20. По (40) рассчитывают:

$$d'_{\text{опр}} = 1,1 \cdot 0,00413 - 0,000056 = 0,003983 \text{ м}$$

и из рекомендуемого ряда (см. с. 79) выбирают ближайшее значение $d_{\text{опр}} = 0,004 \text{ м}$.

21. По (41)

$$d_{\text{сп}} = (0,004 + 0,00056)/1,1 \approx 0,00414 \text{ м}.$$

22. По номограмме (рис. П.3) для $G = 9,55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$, $d_{\text{сп}} = 0,00414 \text{ м}$ и $d_{\text{пр}} = 0,00056 \text{ м}$ находят $K \approx 2,4$.

23. По (42)

$$h = 2,4 \cdot 0,00056 \approx 0,00134 \text{ м}.$$

24. По (43)

$$n_a^* = 0,72/0,00134 \approx 537 \text{ витков}.$$

25. По (44)

$$b_3 = 0,00134/1,15 - 0,00056 \approx 0,0006 \text{ м}.$$

26. Так как периклаз II класса и значение b_3 удовлетворяет условию $0,40 \cdot 10^{-3} < b < 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, выбирают мелкозернистый периклаз марки ППЭ-2М ГОСТ 13236-83.

11. МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ СПИРАЛИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЭНА

Расчеты выполняются как проверочные после определения основных геометрических размеров проектируемого тэна, а также для выявления возможности использования ранее созданного тэна в измененных эксплуатационных условиях и получения дополнительных данных для расчета его надежности.

Задачей расчета является определение температуры спирали $t_{\text{сп}}$ при работе тэна в заданном режиме и нижнего расчетного предела значения электрического сопротивления изоляции $R_{\text{из}}$.

Для проведения расчета необходимы следующие исходные данные: диаметр спирали $d_{\text{сп}}$, м; коэффициент шага ее витков K ; внутренний диаметр оболочки $D_{\text{вт}}$, м; удельная мощность тэна P_L , Вт $\cdot \text{м}^{-1}$; развернутая длина тэна L , м; температура оболочки t_T , °С; класс периклаза, использованного в качестве наполнителя.

Исходные данные позволяют по (12) или (13) рассчитать значение эквивалентного диаметра витков спирали.

В целях ускорения проведения расчетов на основе (13) для ряда значений $D_{\text{вт}}$ построены диаграммы, отражающие взаимосвязь между $d_{\text{сп}}$, K и d_3 (рис. П.1). Для нахождения по диаграммам эквивалентного диаметра витков достаточно по шкале d_3 определить ординату точки с абсциссой $d_{\text{сп}}$. Точка расположена на соответствующей кривой K .

Так как диаграммы составлены лишь для отдельных значений $D_{\text{вт}}$, то при необходимости d_3 можно определить путем линейной интерполяции значений d'_3 и d''_3 , полученных соответственно по диаграммам для ближайшего меньшего значения внутреннего диаметра оболочки $D'_{\text{вт}}$ и для ближайшего большего его значения $D''_{\text{вт}}$, м:

$$d_3 = d'_3 - \frac{D_{\text{вт}} - D'_{\text{вт}}}{D''_{\text{вт}} - D'_{\text{вт}}} (d'_3 - d''_3). \quad (45)$$

Найденное значение d_3 позволяет рассчитать отношение внутренне-го диаметра оболочки к эквивалентному диаметру витков спирали:

$$Z_2 = D_{\text{вт}}/d_3. \quad (46)$$

По шкале Δt номограммы (рис. П.2) определяется температурный перепад между нагревательным элементом и оболочкой. Для этого на линии $P_L = \text{const}$, соответствующей заданному значению P_L , находят точку с ординатой Z_2 .

Затем рассчитывают температуру спирали, °С:

$$t_{\text{сп}} = t_T + \Delta t. \quad (47)$$

Расчетное значение электрического сопротивления изоляции нагревателя в рабочем состоянии также можно определить при помощи номограммы по значениям Z_1 и t_3 , а значение Z_1 рассчитывается так:

$$Z_1 = D_{\text{вт}}/d_{\text{сп}}. \quad (48)$$

Эквивалентная температура может быть определена по (23). В целях ускорения проведения расчетов на основе этого уравнения разработана диаграмма (рис. П.4). По диаграмме, исходя из выбранного класса периклаза и известного значения температурного перепада Δt , находят значение Δt_3 — разницу между эквивалентной температурой и температурой оболочки. Тогда эквивалентная температура

$$t_3 = t_T + \Delta t_3. \quad (49)$$

По шкале $R_{\text{из,л}}$ номограммы (рис. П.2) можно найти значение $R_{\text{из,л}} = LR_{\text{из}}$. Для этого на линии $t_3 = \text{const}$, соответствующей для периклаза заданного класса рассчитанному выше значению t_3 , находят точку с ординатой Z_1 , с абсциссой $R_{\text{из,л}}$.

Затем определяют расчетное значение сопротивления изоляции тэна в рабочем состоянии, Ом:

$$R_{из} = R_{из,л}/L. \quad (50)$$

Пример 2. Расчет температуры спирали тэна и сопротивления электрической изоляции. Необходимо проверить правильность проведенных в примере 1 расчетов по обеспечению требований, предъявляемых к температуре спирали и значению сопротивления изоляции тэна.

Исходные данные для расчета:

$$d_{сп} = 0,00414 \text{ м}; \quad K = 2,4; \quad D_{вт} = 0,011 \text{ м};$$

$$P_L = 2778 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}; \quad L = 0,80 \text{ м}; \quad t_T = 400^\circ \text{С}.$$

Наполнитель тэна — периклаз электротехнический II класса.

Расчет.

1. Так как диаграммы для пересчета $d_{сп}$ и d_3 при $D_{вт} = 0,011$ м нет, то d_3 находят при ближайших меньшем и большем значениях $D_{вт}$, на которые имеются диаграммы. Тогда для $d_{сп} = 0,00414$ м и $K = 2,4$ при $D''_{вт} = 0,01$ м (диаграмма на рис. П.1, б) $d'_3 \approx 0,0038$ м, а при $D''_{вт} = 0,014$ м (диаграмма на рис. П.1, а) $d_3 \approx 0,0036$ м. Затем интерполируют полученные данные по (45):

$$d_3 = 0,0038 - \frac{0,011 - 0,01}{0,014 - 0,01} (0,0038 - 0,0036) = 0,00375 \text{ м}.$$

2. По (46)

$$Z_2 = 0,011 : 0,00375 \approx 2,93.$$

3. По номограмме (рис. П.2) для $Z_2 = 2,93$ и $P_L = 2778 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}$ $\Delta t \approx 240^\circ \text{С}$.

4. В соответствии с (47) $t_{сп} = 400 + 240 = 640^\circ \text{С}$.

5. По (48)

$$Z_1 = 0,011 : 0,00414 \approx 2,66.$$

6. По диаграмме (рис. П.4) для периклаза II класса и $\Delta t = 240^\circ \text{С}$ $\Delta t_3 \approx 93^\circ \text{С}$.

7. В соответствии с (49)

$$t_3 = 400 + 93 = 493^\circ \text{С}.$$

8. По номограмме (рис. П.2) для периклаза II класса при $t_3 = 493^\circ \text{С}$ и для $Z_1 = 2,66 R_{из,л} \approx 2,4 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

9. По (50)

$$R_{из} = 2,4 \cdot 10^6 : 0,80 = 3 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

10. **Заключение.** Расчеты в примере 1 по проверяемым показателям выполнены правильно, так как

$$а) \quad t_{сп} = 640^\circ \text{С} < t_{сп,доп} = 850^\circ \text{С};$$

$$б) R_{из} = 3 \cdot 10^6 \text{ Ом} > R_{из, доп} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

Пример 3. Определение возможности использования тэна в условиях работы, отличающихся от расчетных. Требуется определить допустимые увеличения мощности тэна, рассмотренного в примерах 1 и 2, в 2 раза (за счет повышения значения питающего напряжения) при условии снижения температуры оболочки до 380°C за счет интенсификации теплообмена.

Исходные данные для расчета приняты из примеров 1 и 2:

$$P_L = 2778 \cdot 2 = 5556 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}; \quad t_T = 380^\circ\text{C}; \quad L = 0,80 \text{ м};$$

$$t_{сп, доп} = 850^\circ\text{C}; \quad Z_1 = 2,66; \quad R_{из, доп} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = 2,93.$$

Наполнитель тэна — электротехнический периклаз II класса.

Расчет

1. По номограмме (рис. П.2) для $Z_2 = 2,93$ и $P_L = 5556 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}$ $\Delta t \approx 450^\circ\text{C}$.

2. В соответствии с (47)

$$t_{сп} = 380 + 450 = 830^\circ\text{C}.$$

3. По диаграмме (рис. П.4) для периклаза II класса и $\Delta t = 450^\circ\text{C}$ $\Delta t_9 = 140^\circ\text{C}$.

4. По (49)

$$t_9 = 380 + 140 = 520^\circ\text{C}.$$

5. По номограмме (рис. П.2) для периклаза II класса при $t_9 = 520^\circ\text{C}$ и $Z_1 = 2,66$ — $R_{из, л} \approx 1,7 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

6. По (50)

$$R_{из} = 1,7 \cdot 10^6 : 0,80 = 2,125 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

7. **Заключение.** Увеличение мощности тэна в 2 раза допустимо, так как

$$а) t_{сп} = 830^\circ\text{C} < t_{сп, доп} = 850^\circ\text{C};$$

$$б) R_{из} = 2,125 \cdot 10^6 \text{ Ом} > R_{из, доп} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

12. КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТОВ В ЦЕЛЯХ УЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ШАГА ВИТКОВ СПИРАЛИ

При разработке математической модели нагревателей, положенной в основу их расчета, были приняты условия, что нагревательный элемент соосен с оболочкой, а шаг витков спирали равномерен по всей длине активной части. Практически в тэнах всегда возникают отклонения геометрических параметров спирали от расчетных значений. Эти отклоне-

ния либо вызываются случайными причинами (различие упругопластических свойств проволоки по длине, отклонения ее толщины от номинальной и др.), либо носят систематический характер. Основная причина систематических погрешностей — продольная деформация спирали под воздействием силы тяжести при ее монтаже в трубчатой оболочке.

Сгущение витков может привести к местным превышениям температуры спирали и, следовательно, к снижению долговечности нагревателя. Однако при качественном изготовлении тэна по обычной технологии, принятой на отечественных заводах, последствия случайных отклонений геометрических параметров нагревательного элемента сравнительно невелики, и температура спирали в зоне сгущений ее витков, как правило, не превышает расчетного значения.

Это объясняется тем, что допущения, принятые при разработке математической модели, приводят к завышению значения температурного перепада между нагревательным элементом и оболочкой нагревателя, в связи с чем значение температуры спирали, определяемое расчетным путем, несколько больше ее фактической средней температуры.

Сгущение витков в нижней части спирали при ее монтаже в трубчатой оболочке, вызываемое действием силы тяжести, иногда приводит к местному повышению температуры нагревательного элемента более чем на 200°C по сравнению со среднерасчетной, что отрицательно отражается на работоспособности тэна. Это явление необходимо учитывать при проведении расчетов.

Однако последствия сгущения витков спирали могут оказаться существенными лишь для тэнов с удельной мощностью свыше $1000\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}$, или с длиной активной части L_a более 1,5 м, или имеющих спираль с диаметром витков, более чем в 2 раза превышающим размер их шага.

В этой связи при проведении расчетов нет необходимости учитывать влияние погрешностей шага витков спирали, если справедливо каждое из следующих неравенств:

$$P_L < 1000\text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}; \quad L < 1,5\text{ м}; \quad d_{\text{сп}}/h < 2. \quad (51)$$

Исключение составляют тэны, у которых расчетная температура спирали, определенная по изложенному в § 11 методу, близка к предельно допустимой.

Расчет температуры спирали на участках сгущения витков проводят, исходя из того, что в их зоне местное значение удельной мощности P'_L выше средней расчетной удельной мощности нагревателя P_L .

Величину P'_L определяют так:

$$P'_L = P_L / (1 - \xi), \quad (52)$$

где ξ — относительное уменьшение шага витков в зоне их сгущения.

Значение ξ для сгущений витков, возникающих под воздействием силы тяжести при монтаже спирали, рассчитывают по эмпирической формуле

$$\xi = 0,0084 \frac{L_a d_{\text{сп}}^{2,5}}{K^2 d_{\text{пр}}^{2,7}}. \quad (53)$$

Для тэнов с диаметром спирали 2–6 мм, т.е. для тэнов наиболее распространенных конструкций, значение ξ можно определить графическим методом по номограмме (рис. П.5). В основу номограммы положена формула (53).

Вертикальные линии номограммы имеют вспомогательное значение. В нижней части номограммы нанесена сетка наклонных линий $K = \text{const}$, в верхней части — сетка наклонных линий $C = \text{const}$. Здесь C — индекс спирали, равный отношению среднего диаметра ее витков к диаметру проволоки:

$$C = d_{\text{сп}}/d_{\text{пр}}. \quad (54)$$

Схема применения номограммы показана на рис. 39. Для нахождения по номограмме значений ξ на линии $C = \text{const}$, соответствующей рассчитанному по (54) индексу спирали, находят точку f с ординатой L_a . Затем на пересечении вспомогательной вертикальной линии ab , проходящей через эту точку, с наклонной линией $K = \text{const}$, соответствующей коэффициенту шага спирали, находят точку f' . Тогда значение относительного уменьшения шага витков спирали определяется по шкале ξ как ордината точки f' .

Пример 4. Требуется определить температуру спирали в зоне сгущения ее витков для тэна, рассчитанного в примере 1.

Исходные данные для расчета:

$$P_L = 2778 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}; \quad d_{\text{пр}} = 0,00056 \text{ м}; \quad L_a = 0,72 \text{ м}; \\ K = 2,4; \quad d_{\text{сп}} = 0,00414 \text{ м}; \quad Z_2 = 2,93; \quad t_{\text{сп, доп}} = 850^\circ \text{С}; \\ t_T = 400^\circ \text{С}.$$

Расчет

1. В соответствии с (54)

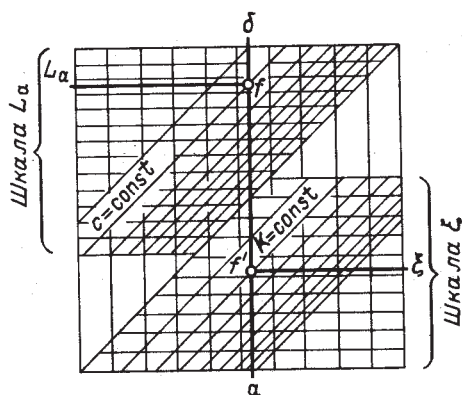
$$C = 0,00414/0,00056 \approx 7,4.$$

2. По номограмме (рис. П.5) для $L_a = 0,72 \text{ м}$, $C = 7,4$ и $K = 2,4$ $\xi \approx 0,18$.

3. По (51)

$$P'_L = \frac{2778}{1 - 0,18} \approx 3388 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}.$$

4. По номограмме (рис. П.1) для $Z_2 = 2,93$ и $P_L = 3388 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}$ $\Delta t' = 280^\circ \text{С}$.



Р и с. 39. Схема пользования номограммой $K = f(G; d_{\text{сп}}; d_{\text{пр}})$

5. По (47)

$$t'_{\text{сп}} = 400 + 280 = 680^{\circ}\text{C}.$$

6. **Заключение.** Температура спирали в зоне сгущения витков $t'_{\text{сп}} = 680^{\circ}\text{C}$, что на 40°C

больше средней расчетной, определенной в примере 2, однако это значение не превышает допустимого предела.

13. СХЕМА РАСЧЕТА ТЭНА ПО УПРОЩЕННОМУ МЕТОДУ

Метод расчета тэнов, описанный в § 10, позволяет определить рациональное соотношение параметров в зависимости от условий эксплуатации нагревателей.

Практика использования метода расчета тэнов, изложенного в § 10, показала, что его применение в полном объеме целесообразно при наличии одного из нижеперечисленных условий.

1. Если тэны предназначены для эксплуатации в жестких режимах по рабочей температуре, удельной мощности, а иногда и по значению питающего электрического напряжения, когда даже небольшие отклонения отдельных конструктивных параметров (например, $d_{\text{сп}}$, $d_{\text{пр}}$, K) от рациональных значений могут резко снизить надежность работы нагревателя. Условием, необходимым для полного объема расчета по методу § 10, следует считать близкие к предельно допустимым значениям значения температуры материала спирали и сопротивлений изоляции нагревателя, что легко выясняется при выполнении расчетов по упрощенному методу.

2. Если нагреватели предназначены для работы в условиях, в которых аварийный выход из строя любого из них может привести к серьезным отрицательным последствиям (к нарушению технологических режимов, сопряженному с безвозвратной порчей материалов, подвергавшихся температурному воздействию; к возникновению пожара или взрывоопасной ситуации; к опасности поражения человека электрическим током и т.п.) к надежности работы нагревателей должны предъявляться повышенные по сравнению с обычными требованиями.

3. Если нагреватели предназначены для выпуска крупными сериями. В этом случае отрицательные последствия снижения уровня их унифи-

кации (например, изготовление спиралей с диаметром оправки, отличающимся от типового) компенсируются экономическим эффектом, который будет достигнут у потребителя за счет рационализации конструкции тэнов и повышения их долговечности.

В остальных случаях целесообразно проводить расчет тэнов по укороченному методу.

Основное отличие от расчета по методу, изложенному в § 10, состоит в том, что диаметр оправки для навивки спирали (или диаметр спирали) не определяют из условия обеспечения рационального соотношения всех конструктивных параметров, а произвольно выбирают в соответствии с принятым на заводе-изготовителе рядом диаметров (обычно 2—3 значения). Помимо этого класс периклаза задают, ориентируясь, как правило, на наибольшую температуру нагрева оболочки при работе рассчитываемого нагревателя, °С (ГОСТ 13268-83 и ГОСТ 19108-81):

Класс периклаза	Тэны общего назначения	Тэны бытового назначения
I	Более 500	Более 250
II	От 250 до 500	От 150 до 250
III	Менее 250	Менее 150

Общая схема расчета иллюстрируется приведенным ниже примером.

Пример 5. Расчет конструктивных параметров тэна по упрощенному методу.

Необходимо спроектировать тэн с техническими данными, перечисленными в примере 1:

$$\begin{aligned}
 P &= 2000 \text{ Вт}; & L_{\kappa} &= 0,04 \text{ м}; & t_{\text{T}} &= 400^{\circ}\text{C}; \\
 U &= 220 \text{ В}; & D &= 0,013 \text{ м}; & t_{\text{сп,доп}} &= 850^{\circ}\text{C}; \\
 L &= 0,80 \text{ м}; & s &= 0,001 \text{ м}; & R_{\text{из,доп}} &= 1,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Материал проволоки для навивки спирали сопротивления — сплав марки Х20Н80-Н.

Требуется определить значения $d_{\text{сп}}$; $d_{\text{пр}}$; K ; n_a , марку периклаза, проверить допустимость навивки спирали на оправку произвольно выбранного диаметра и возможность применения в тэне периклаза, класс которого выбран в соответствии со стандартом или другой технической документацией.

Расчет

1. Задают диаметр оправки, ориентируясь на принятый заводом-изготовителем ряд:

$$d_{\text{опр}} = 0,0032 \text{ м.}$$

2. В соответствии с (25)

$$D_{\text{вт}} = 0,013 - 2 \cdot 0,001 = 0,011 \text{ м.}$$

3. По (24)

$$L_a = 0,80 - 2 \cdot 0,04 = 0,72 \text{ м.}$$

4. По (26)

$$P_L = 2000 : 0,72 = 2778 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}.$$

5. Для сплава Х20Н80-Н (см. с. 77):

$$\rho_a = 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

6. В соответствии с (38)

$$G = \frac{220^2}{4 \cdot 8,8 \cdot 10^{-7} \cdot 0,72 \cdot 2000} \approx 9,55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}.$$

7. По номограмме (см. рис. П.3) для $G = 9,55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$ и $d_{\text{сп}} \approx d_{\text{опр}} = 0,0032 \text{ м}$ $d_{\text{пр}} \approx 0,00041 \div 0,00061 \text{ м}$.

8. Далее рассчитывают среднеарифметическое значение $\bar{d}_{\text{пр}}$:

$$\bar{d}_{\text{пр}} = 0,5(0,00041 + 0,00061) = 0,00051 \text{ м}$$

и из ряда диаметров проволоки выбирают ближайший:

$$d_{\text{пр}} = 0,0005 \text{ м.}$$

9. По (41)

$$d_{\text{сп}} = (0,0032 + 0,0005)/1,1 \approx 0,00336 \text{ м.}$$

10. По номограмме (см. рис. П.3) для $G = 9,55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$; $d_{\text{сп}} = 0,00336 \text{ м}$ и $d_{\text{пр}} = 0,0005 \text{ м}$ $K \approx 2,8$.

11. В соответствии с (36)

$$h = 0,0028 \cdot 0,5 = 0,0014 \text{ м.}$$

12. По (43)

$$n_a = 0,72/0,0014 \approx 514 \text{ витков.}$$

13. Так как диаграмма для пересчета $d_{\text{сп}}$ и d_3 при $D_{\text{вт}} = 0,011 \text{ м}$ нет, то d_3 находят при ближайших меньшем и большем значениях $D_{\text{вт}}$, на которые имеются диаграммы. Тогда для $d_{\text{сп}} = 0,00336 \text{ м}$ и $K = 2,8$ при $D'_{\text{вт}} = 0,01 \text{ м}$ (см. рис. П.1, б) $d'_3 = 0,0027 \text{ м}$, а при $D''_{\text{вт}} = 0,014 \text{ м}$ (см. рис. П.1, а) $d_3 \approx 0,0025 \text{ м}$.

Далее полученные данные интерполируют по (45):

$$d_3 = 0,0027 - \frac{0,011 - 0,01}{0,014 - 0,01} (0,0027 - 0,0025) = 0,00265 \text{ м.}$$

14. По (46)

$$Z_2 = 0,011 : 0,00265 \approx 4,15.$$

15. По номограмме (см. рис. П.2) для $Z_2 = 4,15$ и $P_L = 2778 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}$ $\Delta t = 310^\circ \text{С}$.

16. В соответствии с (47)

$$t_{\text{сп}} = 400 + 310 = 710^\circ \text{С}.$$

17. По приведенным на с. 89 значениям температуры нагрева оболочки для использования в качестве наполнителя выбирают электротехнический периклаз II класса.

18. По диаграмме (см. рис. П.4) для периклаза II класса и $\Delta t = 310^\circ \text{С}$ $\Delta t_3 \approx 110^\circ \text{С}$.

19. По (49)

$$t_3 = 400 + 110 = 510^\circ \text{С}.$$

20. По (48)

$$Z_1 = 0,011 : 0,00336 \approx 3,27.$$

21. По номограмме (см. рис. П.2) для периклаза II класса $t_3 = 510^\circ \text{С}$ и $Z_1 = 3,27$ $R_{\text{из,л}} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

22. В соответствии с (50)

$$R_{\text{из}} = 2,4 \cdot 10^6 : 0,8 = 3 \cdot 10^6 \text{ Ом}.$$

23. По (44)

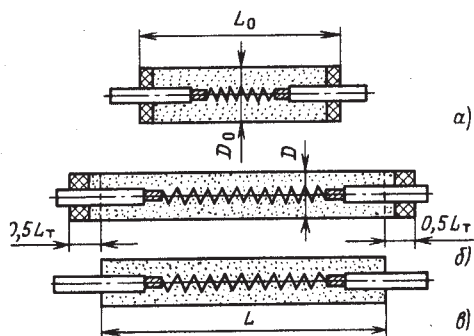
$$b_3 = 0,0014/1,15 - 0,0005 \approx 0,00072 \text{ м}.$$

24. Так как $b_3 > 0,00065 \text{ м}$, выбирают крупнозернистый периклаз марки ППЭ-2К (ГОСТ 13236-83).

Из сопоставления результатов, полученных в примерах 1 и 5, видно, что многие конструктивные параметры тэнов, рассчитанных по упрощенному методу, отличаются от рациональных, определенных в примере 1, вследствие чего расчетное значение температур спирали хотя и не превысило допустимого предела (850°С), однако возросло с 640 до 710°С .

14. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГОТОВОК

Задачей расчета является определение основных геометрических параметров заготовок (наружного диаметра трубы D_0 , длины заготовки трубы L_0 ; длины проволоки заготовки спирали l ; длины заготовки спирали в сжатом состоянии l_0) и контролируемых в процессе изготовления тэнов значений электрического сопротивления (электрических сопротивлений в рабочем состоянии R_a , в холодном состоянии R_x , в холодном состоянии до первого включения R'_x , электрического сопротивления спирали, закрепленной на контактные стержни R_0). Схема изменения геометрических параметров тэнов в процессе их изготовления приведена на рис. 40.



Р и с. 40. Схема измерения основных геометрических параметров тэнов в процессе их изготовления:

а — заготовка тэна до опрессовки; б — заготовка тэна после опрессовки; в — тэн после отрезки технологических концов

Исходными данными при проведении расчета являются:

- 1) мощность тэна в рабочем состоянии P ;
- 2) электрическое напряжение на контактных стержнях U ;
- 3) развернутая длина тэна L ;
- 4) длина активной части тэна L_a ;
- 5) наружный диаметр оболочки тэна D ;
- 6) средний диаметр витков спирали $d_{сп}$;
- 7) коэффициент шага витков спирали K ;
- 8) количество витков активной части спирали n_a ;
- 9) диаметр проволоки спирали $d_{пр}$;
- 10) диаметр оправки для навивки спирали $d_{опр}$;
- 11) температура спирали $t_{сп}$;
- 12) технологический припуск на длину заготовки тэна после опрессовки L_T ;
- 13) количество витков спирали, закрепленных на контактном стержне n_k .

Наружный диаметр заготовки трубы D_0 , м, находят, округляя до целых чисел результаты, полученные по (55) — (57):

$$\text{при } D > 0,01 \quad D_0 = 4/3(D - 0,001); \quad (55)$$

$$\text{при } 0,005 \leq D \leq 0,01 \quad D_0 = D + 0,002; \quad (56)$$

$$\text{при } D < 0,005 \quad D_0 = 1/3(4D + 0,001). \quad (57)$$

Длину заготовки трубы L_0 , м, вычисляют по (58):

$$L_0^* = (L_T + L)/1,2. \quad (58)$$

Длину проволоки заготовки спирали l , м, находят по (59):

$$l^* = 1,07\pi(d_{опр} + d_{пр})(n_a + 2n_k). \quad (59)$$

* Значение параметра определяется ориентировочно и подлежит уточнению при изготовлении опытного образца.

Р и с. 41. Средние значения удельного электрического сопротивления термообработанной проволоки из различных материалов:

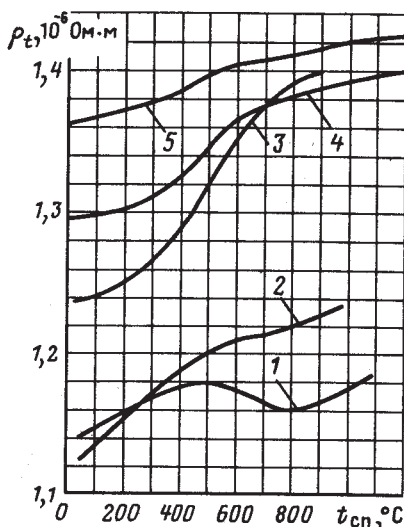
1 — X20H80-H; 2 — X15H60-H; 3 — X23Ю5; 4 — X23Ю5Т; 5 — X27Ю5Т.

Длину заготовки спирали в сжатом состоянии l_0 , м, определяют по (60):

$$l_0^* = d_{\text{пр}}(n_a + 2n_k). \quad (60)$$

Электрическое сопротивление тэна, Ом, в рабочем состоянии определяют по (61):

$$R_a = U^2/P. \quad (61)$$



По диаграмме на рис. 41 в зависимости от материала проволоки и значений температур спирали тэна $t_{\text{сп}}$ в холодном и рабочем состоянии находят значения удельного электрического сопротивления термообработанной проволоки $\rho_{t \text{ раб}}$ и $\rho_{t \text{ х}}$.

Электрическое сопротивление тэна в холодном состоянии R_x , Ом, находят по (62):

$$R_x^* = R_a \rho_{t \text{ х}} / \rho_{t \text{ раб}}. \quad (62)$$

В зависимости от материала проволоки находят значение коэффициента ν , учитывающего изменение электрического сопротивления спирали в результате термического отжига:

X20H80-H	0,96
X15H60-H	0,97
X23Ю5Т, X27Ю5Т	1,04

Электрическое сопротивление тэна в холодном состоянии перед первым включением R'_x , Ом, находят по (63):

$$R_x'^* = \nu R_x. \quad (63)$$

Значение коэффициента α_R , учитывающего изменение сопротивления спирали при опрессовке заготовки тэна, находят так:

$$\alpha_R = 1,92D_0/D - K(0,16 - 10d_{\text{пр}}) - 420d_{\text{пр}} - 30d_{\text{сп}} - 0,09. \quad (64)$$

* Значение параметра определяется ориентировочно и подлежит уточнению при изготовлении опытного образца.

Электрическое сопротивление спирали, закрепленной на контактном стержне, R_0 , Ом, находят по (65):

$$R_0^* = \alpha_R R'_x. \quad (65)$$

Пример 6. Расчет основных параметров заготовок тэна.
Исходные данные для расчета:

$$\begin{aligned} P &= 2000 \text{ Вт}; & D &= 0,013 \text{ м}; & n_a &= 537 \text{ витков}; \\ U &= 220 \text{ В}; & d_{\text{опр}} &= 0,004 \text{ м}; & n_k &= 10 \text{ витков}; \\ L &= 0,80 \text{ м}; & d_{\text{сп}} &= 0,00414 \text{ м}; & t_{\text{сп}} &= 640^\circ \text{С}; \\ L_T &= 0,03 \text{ м}; & d_{\text{пр}} &= 0,00056 \text{ м}; & K &= 2,4. \end{aligned}$$

Материал проволоки для навивки спирали — Х20Н80-Н.

Необходимо определить геометрические параметры заготовок D_0 ; L_0 ; l и l_0 и электрические сопротивления R_a ; R_x ; R'_x и R_0 .

Расчет

1. В соответствии с (55)

$$D_0 = \frac{3}{4} (0,013 - 0,001) = 0,016 \text{ м.}$$

2. По (58)

$$L_0^* = (0,80 + 0,03)/1,2 = 0,692 \text{ м.}$$

3. По (59)

$$l^* = 1,07 \cdot 3,14 (0,004 + 0,00056) (537 + 20) = 8,534 \text{ м.}$$

4. В соответствии с (60)

$$l_0^* = 0,00056(537 + 20) = 0,312 \text{ м.}$$

5. По (61)

$$R_a = 220^2/2000 = 24,2 \text{ Ом.}$$

6. По диаграмме (рис. 41) для сплава Х20Н80-Н

$$\text{при } t_{\text{сп}} = 640^\circ \text{С} \quad \rho_{t_{\text{раб}}} = 0,00000117 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\text{при } t_{\text{сп}} = 20^\circ \text{С} \quad \rho_{t_{\text{хол}}} = 0,00000114 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

7. По (62)

$$R_x^* = 24,2 \cdot 0,00000114/0,00000117 = 23,58 \text{ Ом.}$$

8. По приведенным на с. 93 значениям $\nu = 0,96$.

* Значение параметра определяется ориентировочно и подлежит уточнению при изготовлении опытного образца.

9. По (63)

$$R_x^* = 0,96 \cdot 23,58 = 22,64 \text{ Ом.}$$

10. По (64)

$$\alpha_R = 1,92 \frac{0,016}{0,013} - 2,4(0,16 - 10 \cdot 0,00056) - 420 \cdot 0,00056 - \\ - 30 \cdot 0,00414 - 0,09 \approx 1,543.$$

11. По (65)

$$R_0^* = 1,543 \cdot 22,64 = 34,93 \text{ Ом.}$$

15. ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ ТЭНОВ

Тэны и нагревательные кабели являются неремонтируемыми и невосстанавливаемыми изделиями самостоятельного функционального назначения и по показателям надежности относятся к изделиям первого класса.

Основными показателями надежности тэнов общего назначения являются полный средний и полный установленный ресурсы. Для тэнов бытового назначения показатели надежности устанавливаются в соответствии с показателями на конкретные бытовые приборы, для комплектации которых применяются, как правило, специально разрабатываемые типы тэнов. Для нагревателей специального назначения по требованию заказчика могут быть установлены другие показатели надежности:

безотказность (вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов и др.);

сохраняемость (γ-процентный срок сохраняемости, средний срок сохраняемости) и др.

Подтверждение показателей надежности проводят для всех видов тэнов, включая серийно изготавливаемые нагреватели общего и бытового назначения, путем прямых или ускоренных испытаний тэнов. Подтверждение предусмотренного в стандартах или технических условиях среднего ресурса может осуществляться также методом сбора и обработки официальных данных о наработке тэнов у потребителя. Результаты наработки фиксируют протоколом не реже 1 раза в год. Статистические данные обрабатывают по ГОСТ 27.503-81. При этом исходные данные для планирования и контроля принимаются по ГОСТ 13268-83 и по [8].

В целях сокращения времени, необходимого для определения фактического среднего ресурса тэнов (для подтверждения ресурса, например, 10 000 ч при прямых испытаниях требуется 1,5–2 года и более),

* Значение параметра определяется ориентировочно и подлежит уточнению при изготовлении опытного образца.

Т а б л и ц а 13. Таблица выбора критерия отказа при испытаниях на долговечность в зависимости от конструктивного исполнения и условий эксплуатации тэна

Критерий отказа	Тэны с условным обозначением среды по ГОСТ 13268-83		
	Р, П, И, Щ, Ф, Д, Ч, М	С, Т, Э, О, Н, К, Л	У
Отгорание контактного стержня	△	△	△
Разрушение оболочки	□	△	△
Перегорание спирали на- гревательного элемента	△	□	□
Короткое замыкание между спиралью и обо- лочкой	△	△	△
П р и м е ч а н и е. В таблице обозначено: □ — критерий основного вида отказа; △ — критерий неосновного вида отказа.			

а также сокращения затрат на электроэнергию, изготовление испытательных стендов и т.п. ВНИИЭТО разработан метод ускоренных испытаний тэнов, предназначенных для нагрева газовых сред, который внедрен на ряде заводов—изготовителей тэнов (ОСТ 16.0.800.202-83 "Электронагреватели трубчатые. Методы ускоренных испытаний на надежность").

Ускоренные испытания тэнов, предназначенных для эксплуатации в воздушной среде, проводятся по следующей схеме.

В зависимости от конструктивного исполнения тэна, эксплуатационной среды, условий режима работы определяют наиболее слабый элемент и критерий отказа тэна в соответствии с табл. 13.

Отгорание контактного стержня, разрушение оболочки, перегорание нагревательного элемента, короткое замыкание между нагревательным элементом и оболочкой тэна приводят к мгновенному прекращению функционирования тэна.

Кроме указанных в табл. 13 отказов, могут быть отказы, которые не приводят к мгновенному прекращению функционирования тэна, например, изменение мощности и снижение сопротивления изоляции в горячем состоянии ниже допустимого. Такие отказы могут быть учтены по согласованию между изготовителем и потребителем тэнов.

Определительные испытания по критериям отказа (табл. 13) планируют с доверительной вероятностью $P^* = 0,8$ и относительной доверительной ошибкой $\delta = 0,3 \div 0,5$, при этом в качестве ожидаемого значения односторонней нижней доверительной границы принимают требуемое значение среднего ресурса тэна по ГОСТ 13268-83, а объем выборки N определяют по ГОСТ 27.502-83.

Исходя из экономической целесообразности и требуемой точности, объем выборки принимают из условия $10 \leq N \leq 30$.

В зависимости от вида отказа выбирают один из следующих законов распределения:

Вид отказа	Закон распределения
Отгорание контактного стержня . . .	Экспоненциальный
Разрушение оболочки	Вейбулла
Перегорание нагревательного элемента	Вейбулла
Короткое замыкание между спиралью и оболочкой	Экспоненциальный
Изменение мощности	Нормальный
Снижение сопротивления изоляции в рабочем состоянии	Логарифмически нормальный

Испытания проводят по следующим планам наблюдения отказа:

$[NUN]$; $[NUr]$; $[NUT]$,

где N — число тэнов, поставленных на испытание (объем выборки); U — планы, в которых отказавшие тэны не заменяются новыми; r — число отказов или предельных состояний, до возникновения которых ведутся наблюдения; T — установленная наработка или календарная продолжительность наблюдений.

Планы наблюдений трактуются следующим образом:

$[NUN]$ — на ускоренные форсированные испытания поставлено N тэнов; наблюдения ведутся до возникновения отказа всех тэнов; $N \leq 15$; $[NUr]$ — на ускоренные форсированные испытания поставлено N тэнов, наблюдения ведутся до возникновения r отказов; $N > 15$, при этом $r \geq 0,8N$;

$[NUT]$ — на ускоренные испытания в номинальном режиме поставлено N тэнов.

По результатам испытаний определяют точечное и интервальное значения наработки до отказа (ГОСТ 27.503-81 "Надежность изделий машиностроения. Методы оценки показателей надежности"); при этом нижняя односторонняя доверительная граница наработки до отказа принимается за контрольный показатель долговечности, вносимый в техническую документацию.

Планирование контрольных испытаний на долговечность проводят по двум уровням одноступенчатым методом с ограниченной продолжительностью испытаний t_n и с заданным риском поставщика $\alpha = 0,1$; $0,2$ и риском потребителя $\beta = 0,2$. При этом в качестве браковочного уровня T_β принимают требуемое значение среднего ресурса, а приемочный уровень T_α наработки до отказа определяют, исходя из условия $t_n \geq T_\beta$; при этом планы контроля устанавливают из условия, что приемочное число отказов $0 \leq c \leq 3$.

Объем выборки N и приемочное число отказов c определяют в зависимости от планируемого критерия отказа, заданных значений α , β , T_α , T_β и выбранного t_n .

Контроль наработки до отказа проводят в течение времени t_n , за которое наблюдают число отказов r ; при этом тэны считаются соответствующими требованиям по среднему ресурсу, если $r \leq c$; если же $r > c$, испытания считают неудовлетворительными и партию бракуют.

Пример 7. Проведение ускоренного испытания тэнов.

Экспериментальным методом с доверительной вероятностью $P^* = 0,8$ требуется определить фактическое значение средней наработки до отказа тэнов типа ТЭН-44А13/0,2С220.

Расчетное значение температуры нагревательного элемента тэна в рабочих условиях $T_{сп} = 550^\circ\text{C}$. Диаметр проволоки нагревательного элемента $d_{пр} = 0,3$ мм. Толщина слоя периклаза между спиралью и оболочкой 2,5 мм.

Требуемое согласно ГОСТ 13268-83 среднее значение суммарной наработки до отказа не менее $1,1 \cdot 10^4$ ч, режим работы постоянный.

1. В данном примере ускоренные испытания в форсированном режиме планируют по критерию основного вида отказа в соответствии с табл. 13. Критерием отказа будет перегорание нагревательного элемента тэна.

2. Уровень форсирующего фактора — температура нагревательного элемента — принимается равной 1000°C и по рис. 42 для $T = 550^\circ\text{C}$ определяется коэффициент ускорения $K_y = 70$.

Рассчитывают ожидаемую наработку в форсированном режиме:

$$t_{ож}(\epsilon_T) = 11\,000/70 = 157 \text{ ч.}$$

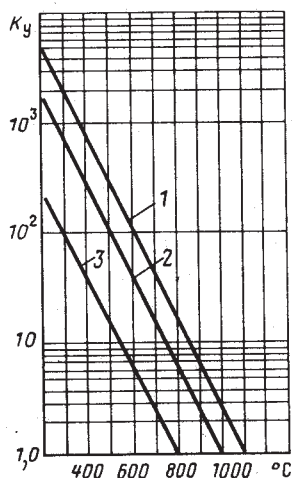
3. Определяют объем выборки для распределения Вейбулла по плану $[NUN]$, считая $\delta = 0,2$; $\beta = 0,9$; $\nu = 0,6$.

Объем выборки составит $N = 20$ шт. (ГОСТ 27.502-83).

4. Проводят испытания всех тэнов одновременно при температуре нагревательного элемента 1000°C в термостатированной камере, которая представляет собой изолированную камеру, позволяющую повысить температуру тэнов до требуемой. Испытания прекращаются после отказа последнего нагревателя выборки. Пусть наработки распределились следующим образом: 152, 220 ... 900 ч.

5. Графическим методом проверяют экспериментальное распределение наработок на соответствие определенному закону распределения. Одновременно определяют параметры распределения. Наиболее близкое совпадение в данном случае получено с распределением Вейбулла: $\bar{a} = 550$ ч, $\bar{B} = 3$.

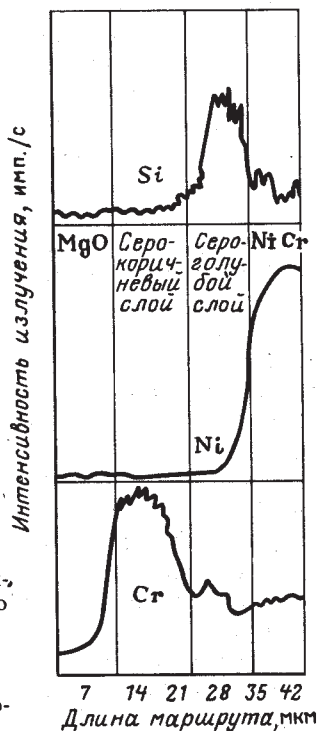
6. Уточняют оценки параметров и доверительных границ для распределения Вейбулла. Определяют средний ресурс в форсированном режи-



Р и с. 42. Зависимость коэффициента ускорения ресурсных испытаний от рабочей температуры нагревательного элемента тэна при испытаниях в постоянном режиме. Критерий отказа — перегорание элемента. Испытания при температуре нагревательного элемента тэна:

1 — 1100 °C; 2 — 1000 °C; 3 — 800 °C

Р и с. 43. Концентрация распределения кремния, хрома и никеля в окисном слое



ме. Проводят оценки нижней границы среднего ресурса:

$$t_{(\epsilon_T)} = k_B \bar{a} = 0,893 \cdot 550 = 491 \text{ ч;}$$

$$t_{\text{H}}(\epsilon_T) = k_B a_{\text{H}} = 0,893 \cdot 506 = 452 \text{ ч,}$$

$$\text{где } a_{\text{H}} = \bar{a} \sqrt[3]{r_3} = 550 \sqrt[3]{0,77} = 506 \text{ ч.}$$

7. Умножая оценку нижней границы среднего ресурса в форсированном режиме $t_{\text{H}}(\epsilon_T)$ на коэффициент ускорения $K_y = 70$, получают $t_{\text{H}} = 31\,640 \text{ ч}$, что больше $11\,000 \text{ ч}$. Значит, по работе нагревательного элемента тэны соответствуют требованию надежности.

Многочисленные ресурсные испытания (как прямые, так и ускоренные), проведенные с рядом типоразмеров тэнов, и анализ элементов тэнов, прошедших различную наработку, показали, что срок их службы во многом зависит от класса (марки) и качества электротехнического периклаза, трубы, проволоки спирали, а также от уровня технологии изготовления тэна.

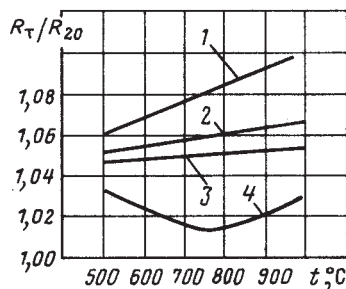
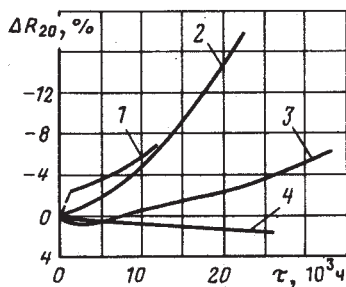
Установлено, что в процессе эксплуатации тэнов происходит взаимодействие периклаза со сплавом сопротивления и металлом оболочки. В зоне взаимодействия образуются три характерных слоя [8]. Первый, примыкающий к элементу из нихрома, голубовато-серого цвета, хрупкий, легко выкрашивается. Второй слой светло-серого цвета с легким коричневатым оттенком. Четкой границы между этими слоями нет, во многих местах они проникают друг в друга. Третий слой потемневшего периклаза хорошо виден в поляризованном свете, он имеет четкую границу со вторым слоем. Микротвердость второго слоя наибольшая (до $1500 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-2}$), а твердости слоев потемневшего и исходного периклаза близки ($800\text{--}1100 \text{ кг} \cdot \text{мм}^{-2}$).

По мере увеличения наработки окисленный слой и зона потемневшего периклаза растут, причем последняя увеличивается более интенсивно. Окисленный слой наиболее интенсивно увеличивается в первые $500\text{--}1000$ ч работы тэна. Толщина окисленного слоя и зоны потемневшего периклаза в контакте элемента сопротивления с периклазом больше, чем в контакте оболочки с периклазом, из-за более высокой температуры элемента. Исследования микроструктуры элемента сопротивления и оболочки тэна позволили установить, что уже после 70 ч наработки зерно нихрома выросло с 16 до 250 мкм, дальнейшая наработка не приводила к заметному росту зерен. Для материала элемента сопротивления характерно внутреннее окисление в процессе наработки. Разрушение в структуре имеет преимущественно межкристаллитный характер с образованием коррозионных язв.

В структуре оболочки происходит активное выделение карбидов по границам зерен аустенита. С поверхности оболочки как со стороны периклаза, так и с наружной происходит выгорание углерода. Изображенная на рис. 43 рентгенограмма показывает на значительное содержание кремния в зоне, непосредственно примыкающей ($0\text{--}10$ мкм) к нихрому. Концентрация кремния здесь в несколько раз выше, чем в нихроме или периклазе. Концентрация хрома в этой зоне такая же, как и в нихроме. В зоне, находящейся на расстоянии $10\text{--}20$ мкм от нихрома, концентрация хрома резко увеличивается и превышает концентрацию хрома в нихроме, в то время как концентрация кремния снижается до уровня его содержания в периклазе. Концентрация никеля изменяется от уровня содержания в нихроме до уровня содержания в периклазе (менее $0,01\%$) в зоне, примыкающей к нихрому, протяженностью $5\text{--}7$ мкм.

Таким образом, в процессе работы тэна происходят, с одной стороны, уменьшение диаметра проволоки элемента сопротивления, а с другой — межкристаллическая коррозия, что связано с разупрочнением сплава и снижением в нем концентрации хрома.

По характеру изменения электрического сопротивления в холодном состоянии (рис. 44) видно, что при более низких температурах нагревателя в первые часы наработки тэнов влияние процесса поверхностно-



Р и с. 44. Зависимость изменения электрического сопротивления тэна в холодном состоянии от времени наработки при температуре нагревательного элемента:

1 — 1000 °C; 2 — 980 °C; 3 — 860 °C; 4 — 740 °C

Р и с. 45. Зависимость отношения R_{τ}/R_{20} от температуры, построенная согласно ГОСТ 12766.1-77 для сплава X20H80-N (4), и та же зависимость для тэнов после наработки 20 000 ч при различных температурах нагревательного элемента (1–3):

1 — 980 °C; 2 — 860 °C; 3 — 740 °C

го окисления преобладает над разупрочнением сплава. Зависимости изменения отношения электрического сопротивления тэна в рабочем состоянии к электрическому сопротивлению в холодном состоянии приведены на рис. 45. Скачок в изменении значений электрического сопротивления, наблюдаемый на кривой 1 (рис. 44) на начальном участке наработки, объясняется снятием напряжения деформации в нагревателе после опрессовки тэна. На кривых 2, 3 и 4 такого явления не наблюдается, так как тэны были термообработаны.

Анализ обследования ряда предприятий, эксплуатирующих тэны в Москве, Волгограде, Орле и других городах, показал, что на срок безотказной работы тэнов в значительной степени влияют условия эксплуатации и технического обслуживания, а также контроль температурных режимов оболочки тэна.

Для проведения расчетов надежности обследованные тэны были разбиты на группы, в каждой из которых определяющим фактором была нагреваемая среда.

Группа тэнов, эксплуатирующихся в воздушной среде, была разбита на две подгруппы:

в первую подгруппу вошли тэны, которые в процессе эксплуатации имели недостаточно квалифицированное обслуживание или недопустимо интенсивный режим эксплуатации (местные превышения температуры до 800 °C, слабые контактные соединения и др.);

во вторую подгруппу объединены тэны, эксплуатация которых проводилась при хорошем техническом обслуживании, включающем их периодический контроль, и в более облегченном режиме (рабочая температура до 500 °C).

Определенные методом наименьших квадратов точечные значения параметров составили:

для первой группы $\bar{T} = 2841$ ч; $\bar{\sigma} = 1794$ ч;

для второй группы $\bar{T} = 12\,392$ ч; $\bar{\sigma} = 1935$ ч;

$P^* = 0,89$ для $\tau = 10\,000$ ч,

здесь $\bar{T}$ — точечное значение среднего времени наработки, ч; $\bar{\sigma}$ — точечное значение среднего квадратического отклонения, ч; P^* — вероятность безотказной работы.

Отечественные нагреватели для нагрева жидких сред имеют в качестве материала оболочек в основном сталь 10, как с покрытием, так и без покрытий, реже — сталь 12Х18Н10Т, а также медь, латунь и сплавы алюминия. Срок службы тэнов, работающих в жидких средах, зависит от качества обслуживания и правильности эксплуатации, а также в значительной степени от соответствия материала оболочки обогреваемой среде.

Следовательно, правильный выбор материала оболочки тэнов имеет определяющее значение. Требования к условиям эксплуатации тэнов для жидких сред также имеют существенные отличия от требований к эксплуатации воздушных тэнов. Для тэнов, эксплуатируемых в жесткой воде, характерно образование в процессе их работы слоя накипи, налетов за счет выпадения из жидкостей различных веществ, которые резко снижают условия теплообмена между жидкостью и оболочкой тэна и приводят к существенному повышению температуры периклаза и спирали (иногда на несколько сотен градусов).

При работе тэнов в мягкой воде (жесткость менее $1,5$ мг · экв/л) определяющим фактором надежности нагревателя является коррозия оболочки; при использовании оболочки из углеродистой стали ресурс таких тэнов в мягкой воде составляет 2–3 тыс. ч.

На эксплуатацию тэнов для нагрева кислотных, щелочных и селитровых сред правильный выбор материала оболочки и соблюдение правил эксплуатации оказывают еще более существенное влияние. По данным разных заводов, срок службы таких нагревателей зависит только от условий эксплуатации и колеблется от 500 до 7000 ч.

Анализ характера отказов тэнов, эксплуатировавшихся на промышленных предприятиях, показал, что выход тэнов из строя обусловлен как случайными отказами, так и отказами в результате износа. Причинами случайных отказов являются дефекты, возникающие, как правило, в процессе изготовления и при грубом нарушении правил эксплуатации тэнов. По некоторым данным, в течение первых 500 ч работы тэны имеют до 10 % отказов, что свидетельствует в основном о технологических дефектах. Выходы из строя тэнов, работающих в различных средах, из-за отгорания выводного стержня наблюдаются в условиях промышленной эксплуатации довольно часто и составляют значительную часть всех отказов. В табл. 14 приведена усредненная информация о ко-

Т а б л и ц а 14. Количество и виды отказов различных узлов тэнов

Нагреваемая среда	Наименование отказавшего узла в тэне			
	Выводной стержень	Оболочка	Спираль	Изоляция и узел герметизации
Воздух	44	14	13	13
Вода	7	27	9	12
Масло	10	9	3	4
Металл	—	3	2	1
Щелочь, кислота	4	27	15	20
Селитра	2	11	2	6

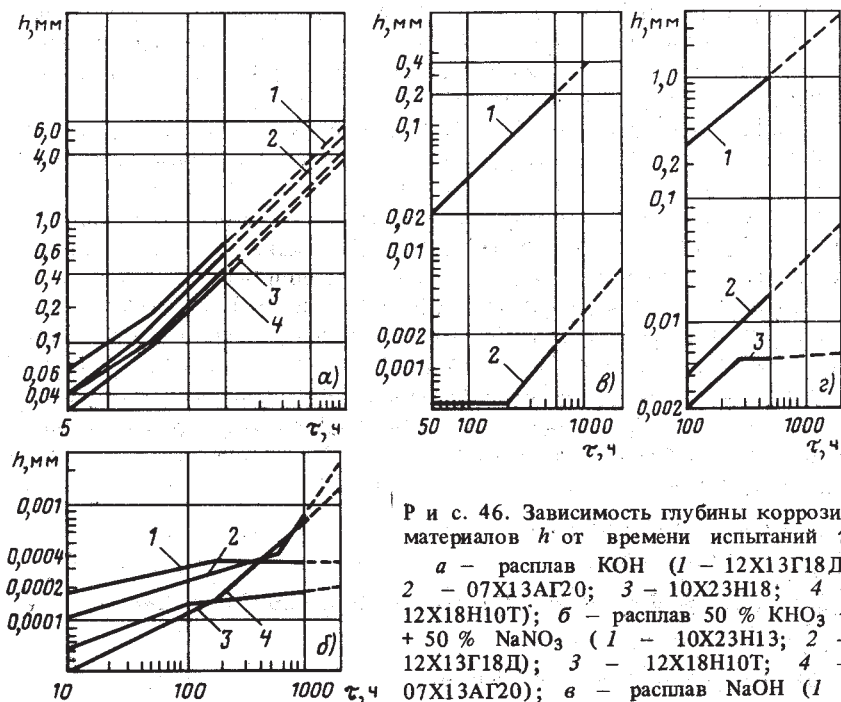
личестве и видах отказов тэнов при эксплуатации более чем на 80 предприятиях.

В табл. 14 приведены наименее надежные узлы тэнов, отказы по которым в различных средах наиболее интенсивны.

Во ВНИИЭТО проведены исследования коррозионной стойкости ряда хромоникелевых и углеродистых сталей в расплавах NaOH , KOH , KNO_3 , NaNO_3 и их смесях при температуре 500°C . Исследования проводили на образцах в виде пластин из сталей марок 10, 20, 12Х18Н10Т, которые находят широкое применение для изготовления оболочек тэнов, а также из сталей марок 10Х23Н18, 07Х13Г18Д и стали 20 с никелевым покрытием.

На рис. 46 приведены графики зависимости глубины общей коррозии материалов от времени выдержки в агрессивных средах при 500°C . Испытания показали, что легированные стали имеют невысокую коррозионную стойкость в расплавах щелочей и щелочно-селитровых смесях с высокой концентрацией щелочи. Коррозия хромоникелевых сталей в этих средах вызывается избирательным растворением хрома, препятствующим образованию сплошной защитной окисной пленки. Более высокая коррозионная стойкость углеродистых сталей в этих средах является следствием пассивации поверхности образцов в расплавах щелочей и селитр, выражающейся в появлении плотной трудно-растворимой пленки окислов, которая препятствует дальнейшему окислению металла. В расплаве 50 % KNO_3 + 50 % NaNO_3 по массе все испытанные марки сталей обладают достаточно высокой коррозионной стойкостью [9].

На одном из заводов в расплаве селитры NaNO_3 в течение 1,5 лет проводилась контрольная эксплуатация тэнов в нескольких ваннах. Одновременно в эксплуатации находилось 1116 тэнов мощностью 6,3 и 8,0 кВт, в развинутой длиной 5,6 м. По мере выхода тэнов из строя их заменяли новыми. Все контролируемые нагреватели имели оболочку из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. При анализе информации



Р и с. 46. Зависимость глубины коррозии материалов h от времени испытаний τ :

а — расплав КОН (1 — 12X13Г18Д; 2 — 07X13АГ20; 3 — 10Х23Н18; 4 — 12Х18Н10Т); б — расплав 50 % KNO_3 + 50 % NaNO_3 (1 — 10Х23Н13; 2 — 12Х13Г18Д); 3 — 12Х18Н10Т; 4 — 07Х13АГ20); в — расплав NaOH (1 — 12Х18Н10Т; 2 — никелевое покрытие

на стали 20); г — расплав 70 % NaOH + 30 % KNO_3 (1 — 12Х18Н10Т; 2 — сталь 20; 3 — никелевое покрытие на стали 20)

определяли точечные значения интенсивности потока отказов тэнов:

$$\bar{\lambda} = r/Nt_0, \quad (66)$$

где t_0 — наработка партии за время наблюдений; N — количество постоянно работающих тэнов; r — количество отказов за время наработки.

Доверительные границы для λ с доверительной вероятностью $P^* = 0,8$ определяли по формулам

$$\lambda_n = \frac{\bar{\lambda} \chi^2 \frac{1-P^*}{2}, 2r}{2r}; \quad \lambda_v = \frac{\bar{\lambda} \chi^2 \frac{1+P^*}{2}, 2r}{2r}. \quad (67)$$

Исходя из полученных значений интенсивности отказов тэнов, определены средняя, верхняя и нижняя наработки тэнов в расплаве селитры NaNO_3 при температурах от 440–450 до 520–530 °С $8430 \text{ ч} \leq \bar{\tau} \leq 15330 \text{ ч}$; $\bar{\tau} = 10060 \text{ ч}$.

Одновременно на том же заводе были проведены сравнительные испытания в расплаве селитры NaNO_3 в одной ванне двух групп тэнов с оболочками из стали 12X18H10T и стали 20. Испытания показали, что за время эксплуатации в течение 5000 ч выход из строя тэнов с оболочками из стали 12X18H10T составил 25 %, а из стали 20—29 %. Тэны с оболочками из стали 20 после изготовления подвергали термообработке при температуре 900–930 °C.

Полученные результаты подтвердили, что при соблюдении минимальных требований по эксплуатации тэнов, работающих в селитре, даже для весьма жестких технологических условий средний ресурс тэнов в одинарной оболочке как из стали 12X18H10T, так и из стали 10 составляет около 40 000 ч. В то же время из анкетных данных заводов—потребителей тэнов следует, что во многих случаях средний ресурс тэнов, работающих в селитре, составляет менее 5000 ч, что свидетельствует о прямой зависимости между долговечностью нагревателей и соблюдением правил их эксплуатации.

Глава четвертая

ВЫБОР ТЭНОВ ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

16. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ВЫБОРА ТЭНОВ

В ряде случаев для оснащения нагревательных устройств нет необходимости в создании специальных тэнов, так как промышленностью освоено производство широкой номенклатуры тэнов общего назначения, из числа которых можно выбрать серийное изделие, обеспечивающее работу устройства в заданном режиме.

В СССР периодически издаются каталоги тэнов, в которых приводятся данные об основных конструктивных параметрах и расчетных условиях эксплуатации тэнов общего назначения, о конфигурации нагревателей и перечень заводов-изготовителей.

Работоспособность тэнов при использовании в той или иной установке в большой степени зависит от правильности их выбора. Поэтому необходимо уметь определять тип тэна, наиболее полно отвечающий по всем своим параметрам конкретным условиям применения.

Выбор тэнов, предназначенных для нагрева воды, слабых водных растворов щелочей и кислот, плавления легкоплавких металлов и нагрева теплопроводностью металлических изделий, осуществляют по следующей схеме:

- 1) исходя из конструктивных особенностей нагревательного устройства, определяют желательные габаритные размеры тэнов (общую длину и диаметр), форму их изгиба и длину контактных стержней в заделке.

2) в зависимости от вида нагреваемой среды и рабочей температуры определяют материалы оболочки, обеспечивающие требуемую стойкость нагревателя к воздействию этих факторов;

3) в зависимости от вида нагреваемой среды и материала оболочки по табл. 1 находят максимальные значения удельной поверхностной мощности нагревателей;

4) исходя из значения максимальной удельной поверхностной мощности и желательной длины активной части, рассчитывают максимальную мощность одного типа;

5) в соответствии с ранее определенными данными и с учетом значения электрического напряжения по каталогу выбирают тэн;

6) исходя из необходимости обеспечения требуемого температурного режима нагревательной установки в процессе работы или исходя из требований, предъявляемых к скорости выхода на рабочий режим, рассчитывают общую мощность тэнов, учитывая при этом мощность, необходимую для компенсации тепловых потерь, нагрева вспомогательного оборудования и т.п.;

7) рассчитывают количество тэнов выбранного вида, обеспечивающее работоспособность установки.

Выбор тэнов для нагрева воздуха, пищевых жиров и минеральных масел осложняется тем, что коэффициенты теплоотдачи поверхности тэнов в эти среды сравнительно малы, в связи с чем температура их оболочки может значительно (иногда на несколько сотен градусов) превышать температуру окружающей среды. В этом случае необходимо учитывать конкретные особенности работы устройства в целом, влияющие на интенсивность теплоотдачи от тэнов. Выбор тэнов обычно осуществляют по следующей схеме:

1) и 2) — как в предыдущей схеме;

3) в зависимости от условий циркуляции нагреваемой среды, материала оболочки и допустимой температуры ее нагрева по табл. 1 находят максимально допустимое значение удельной поверхностной мощности нагревателей;

4), 5), 6) и 7) — как в предыдущей схеме;

8) исходя из условий размещения и удельной поверхностной мощности выбранных тэнов, условий циркуляции среды и ее температуры, рассчитывают температуру оболочки тэнов;

9) если расчетная температура оболочки не превышает допустимую, то выбор тэнов считают законченным. Если расчетная температура выше допустимой, то по каталогу повторно выбирают тэн, учитывая ранее определенные конструктивные параметры, но при этом снизив мощность одного нагревателя; после чего повторяют действия по пунктам 7, 8 и 9.

Рекомендации по выполнению отдельных этапов выбора тэнов приводятся ниже.

17. ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЭНОВ

Одним из основных параметров типажного ряда тэнов является их развернутая длина L . Номинальные значения развернутой длины в соответствии с каталогом 12.30.09-86 приведены в § 2.

При выборе необходимого значения развернутой длины учитывают стандартные конфигурации тэнов по форме их изгиба (приведены в каталоге). В виде исключения конфигурации тэнов можно изменять (по сравнению с каталогом) на предприятиях-заказчиках с целью придания им специальной формы для установки по месту.

При выборе вариантов размещения тэнов обычно руководствуются следующими общими правилами:

в устройствах для нагрева газообразных или легкоподвижных жидких сред в условиях естественной конвекции нагреватели целесообразно располагать так, чтобы активные части тэнов в основном находились в нижней зоне рабочего пространства;

в устройствах для нагрева движущихся газообразных и жидких сред, а также для нагрева вязких сред нагреватели целесообразно располагать по всему объему рабочего пространства, при этом желательно обеспечить поперечное обтекание их потоком газа жидкости.

Существенным конструктивным параметром тэнов является длина контактных стержней в заделке L_k . Выбор нагревателя с более длинными контактными стержнями (пассивной частью) при сохранении габаритных размеров и мощности приводит к повышению напряженности работы активной зоны, что может отрицательно повлиять на его долговечность. Однако во многих случаях специфические особенности конструкции нагревательных устройств вызывают необходимость выбора тэнов с удлиненными контактными стержнями. Длина контактных стержней в заделке должна быть достаточной, чтобы:

гарантировать нахождение всей активной зоны нагревателей в нагреваемой среде; например, для нагрева воды контактные стержни в заделке должны иметь такие длины, которые при возможных колебаниях уровня жидкости, исключали бы вероятность появления любого участка активной зоны над ее поверхностью, так как в противном случае тэн быстро выйдет из строя из-за превышения температуры;

обеспечить достаточное удаление узлов герметизации от активной части тэнов, а в некоторых случаях и от "горячей" зоны нагревательной установки, с тем чтобы их температура не превышала определенного для каждого вида герметизирующего материала значения (100—200 °C).

разместить коммутационные части тэнов в доступном для подсоединения к токоведущим шинам месте, отвечающем требованиям техники безопасности и правилам эксплуатации электроустановок.

При выборе диаметра оболочки исходят из того, что с уменьшением его значения снижается удельная (на единицу длины) материалоемкость нагревателей и появляется возможность придания им более

компактных для установки по месту форм, так как при этом допускается выполнять гибку по меньшему радиусу и сам процесс гибки тэна облегчается.

В то же время снижение диаметра оболочки приводит к уменьшению площади теплоотдающей поверхности, в связи с чем возрастает количество нагревателей или их длина.

18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОЩНОСТИ ТЭНОВ И РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ИХ ОБОЛОЧКИ

Удельная поверхностная мощность, равная удельному тепловому потоку с поверхности тэна, измеряется отношением мощности нагревателя к площади наружной поверхности его активной зоны.

При мощности нагревателя P , длине активной зоны L_a и наружном диаметре оболочки D удельная поверхностная мощность

$$p_w = P/\pi L_a D \approx 0,32 P_L / D. \quad (68)$$

При повышении плотности удельного потока при прочих равных условиях возрастают температура поверхности тэна и перепад температур между нагревательным элементом нагревателя и оболочкой. Кроме того, это влечет за собой ухудшение электроизоляционных характеристик тэна.

В этой связи экономически оправданное стремление применять тэны с большими значениями удельной поверхностной мощности для снижения общих габаритных размеров оборудования ограничивается условием долговечности нагревателей, зависящей от температур оболочки и нагревательного элемента.

Обычно при проектировании тэна превалярующим фактором, ограничивающим значение удельного теплового потока, является температура оболочки; температура нагревательного элемента и сопротивление изоляции, как правило, находятся в допустимых диапазонах. В связи с этим задача проверочных расчетов сводится к определению температуры оболочки выбранных тэнов при работе в составе конкретной установки.

Расчет температуры поверхности оболочки выполняется на основе общей теории теплопередачи [10]. Основная расчетная формула имеет вид

$$t_T = t_{cp} + p_w / \alpha. \quad (69)$$

Значение коэффициента теплоотдачи α в обычной практике применения тэнов может изменяться в широких пределах, приблизительно от 10 до $4 \cdot 10^4$ Вт $\cdot$ м $^{-2}$ $\cdot$ $^{\circ}$ С $^{-1}$. Его значение зависит от физических свойств среды, характера ее движения, размеров нагревателей, их расположения

и ряда иных факторов, в том числе и от температуры оболочки, т.е. от параметра, подлежащего расчету.

Накопленный опыт эксплуатации тэнов показал, что иногда вполне достаточно находить лишь приближенное значение температуры оболочки в соответствии со следующими рекомендациями:

для тэнов, погруженных в воду и иные легкоподвижные капельные жидкости, t_T считать на 5–15 °С превышающей температуру основной массы среды;

для тэнов, погруженных в расплавленные металлы и залитых в металлические изделия, t_T считать равной температуре нагреваемой среды в слоях, близких к поверхности нагревателей.

В некоторых случаях применения тэнов, например при их использовании для нагрева воздуха, различных жиров и масел, температура оболочки обычно значительно отличается от температуры среды, а значение перепада температур изменяется в широких пределах. Поэтому пренебрежение каким-либо фактором, влияющим на интенсивность теплоотдачи, может привести к существенным ошибкам и определение температуры t_T необходимо производить расчетным путем.

В целях ускорения выполнения приближенных расчетов разработаны специальные номограммы, приведенные в прилож. 2 и 3. Принципы построения номограмм и правила пользования ими описаны ниже.

Номограммы для определения температуры поверхности тэнов, работающих в воздушной среде в условиях естественной конвекции. В основу построения расчетной номограммы $\Delta t'$, p_w (см. рис. П.7, прилож. 2) положены формула (69) и известное уравнение [10], отражающее зависимость радиационной составляющей коэффициента теплоотдачи, Вт/(м² · К), от температур нагрева поверхности тэнов T_T , K и окружающей среды T_{cp} , К:

$$\alpha_{\Lambda} = 5,67\epsilon \frac{(T_T^4 - T_{cp}^4)}{10^8 (T_T - T_{cp})}, \quad (70)$$

где ϵ — коэффициент излучения системы (при расчете тэнов с оболочкой из стали принято $\epsilon = 0,8$).

Номограмма составлена для случая нагрева газов редко расположенным тэнами, что позволило при ее построении не учитывать взаимного затенения тэнов. В условиях естественной конвекции можно с достаточной точностью принять равенство температур газа (жидкости) и окружающего пространства.

В левой части номограммы размещена шкала разностей температур между оболочкой тэнов и окружающей средой (газом или жидкостью) $\Delta t'$, а в нижней — шкала α_{Λ} . В соответствии с этими шкалами и уравнением (70) на номограмме нанесена сетка кривых линий $t_{cp} = \text{const}$ (наклон вправо) в пределах изменения температуры среды от 0 до 600 °С. Кривые $t_{cp} = \text{const}$ для температур ниже 0 °С (штриховые

линии) имеют вспомогательное значение и могут быть использованы для корректировки графических построений при расчете пучка тэнов. Кроме того, на номограмме нанесена сетка кривых $p_w = \text{const}$, построенных в соответствии с уравнением (69), в котором коэффициент теплоотдачи α условно заменен расчетным значением радиационной составляющей α_Λ .

В некоторых случаях коэффициент теплоотдачи может быть выражен как сумма конвективной и радиационной составляющих. Такой подход возможен, когда температура окружающей среды равна температуре нагреваемого газа и площади поверхностей конвективной и радиационной составляющих теплообмена одинаковы. Указанные условия соответствуют нагреву газа тэнами при естественной конвекции. Следовательно, можно записать:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_\Lambda. \quad (71)$$

Тогда расчет температуры оболочки по номограмме сводится к определению по шкале $\Delta t'$ ординаты, для которой расстояние между кривыми $t_{cp} = \text{const}$ и $p_w = \text{const}$, соответствующими наибольшей температуре нагрева воздуха и удельной поверхностной мощности нагревателей, было бы равно значению α_k , выраженному в масштабе α_Λ . Тогда температура оболочки легко вычисляется по выражению

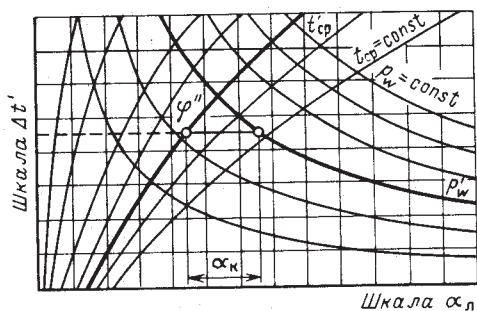
$$t_T = t_{cp} + \Delta t'. \quad (72)$$

Значение α_k при поперечном обдуве одиночного или редко расположенных тэнов определяется по дополнительной номограмме $\alpha_k = f(t_{cp}; v; D)$, приведенной на рис. П.6. В основу построения этой номограммы заложено уравнение подобия, служащее для расчета конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи в зависимости от теплофизических свойств воздуха, скорости его движения v и наружного диаметра оболочки тэнов D . На номограмме нанесена сетка кривых $v = \text{const}$ и $D = \text{const}$. Для удобства проведения расчетов номограммы П.6 и П.7 составлены в едином масштабе.

Схема пользования номограммами иллюстрируется рис. 47 и 48.

Для расчета температуры поверхности одиночных или редко расположенных тэнов с диаметром оболочки $D = D'$ мм при известных значениях удельной поверхностной мощности $p_w = p_w'$, Вт $\cdot$ м $^{-2}$, температуры нагрева воздуха $t_{cp} = t'_{cp}$, °С, и скорости его движения $v = v'$, м $\cdot$ с $^{-1}$, по номограмме $\alpha_k = f(t_{cp}; v; D)$ (рис. 48) на линии v' находят точку φ с ординатой t_{cp} . Проводя через эту точку вертикаль ab , на ее пересечении с линией D' находят точку φ' . Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи определяется как ордината точки φ' по шкале α_k .

Значение $\Delta t'$ по номограмме (рис. 47) можно определять следующим способом. На кромке листа бумаги отмечают границы отрезка, равно-



Р и с. 47. Схема пользования номограммой Δt , p_w для воздушной среды

го ординате точки ϕ' , найденной по номограмме (рис. 48). Затем накладывают этот лист на номограмму (рис. 47) таким образом, чтобы правая метка совпадала с линией p_w , а обрез листа был параллелен основанию номограммы, и в таком положении перемещают его по линии p_w вплоть до совпадения левой метки с линией t_{cp} . Тогда значение $\Delta t'$ будет соответствовать ординате кромки листа. Затем по (72) рассчитывают температуру оболочки тэнов.

Пример 8. Требуется определить температуру оболочки тэна при поперечном обдуве его воздухом.

Исходные данные для расчета: $P_L = 1500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}$; $\nu = 6 \text{ м/сек}$; $D = 0,013 \text{ м}$; $t_{cp} = 200^\circ \text{C}$.

Расчет

1. В соответствии с (68)

$$p_w = 0,32 \cdot 1500 / 0,013 = 3,69 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

2. По номограмме (см. рис. П.6) при $t_{cp} = 200^\circ \text{C}$; $\nu = 6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и $D = 0,013 \text{ м}$ $\alpha_k \approx 75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$.

3. По номограмме (см. рис. П.7) при $t_{cp} = 200^\circ \text{C}$; $p_w = 3,69 \cdot 10^4 \cdot \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $\alpha_k = 75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ $\Delta t' \approx 304^\circ \text{C}$.

4. По (72)

$$t_T = 200 + 304 = 504^\circ \text{C}.$$

Разработанные номограммы позволяют при выборе тэнов более точно определять допустимые значения удельной поверхностной мощности нагревателей, чем по табл. 1. Для этого достаточно на номограмме (см. рис. П.7) по линии, соответствующей допустимому значению $\Delta t'$, вправо от кривой t_{cp} отложить отрезок, равный значению α_k . Максимальное значение удельной поверхностной мощности определится по положению правого конца отрезка относительно кривых $p_w = \text{const}$.

Номограммы для определения температуры поверхности горизонтально расположенных тэнов, работающих в масляных средах (с большими

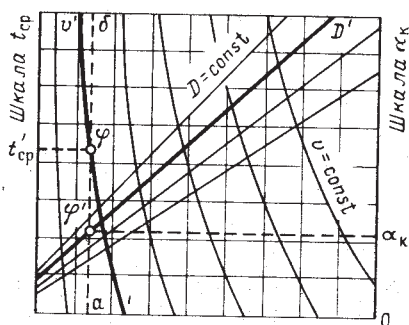


Рис. 48. Схема пользования номограммой $\alpha_k = f(t_{cp}; \nu; D)$

объемами масла). Основная расчетная номограмма $\Delta t', \rho_w$ (см. рис. П.8 прилож. 3) построена в соответствии с (69) и критериальными уравнениями, отражающими зависимость коэффициента теплоотдачи α от теплофизических свойств масла марки МК при отсутствии его

принудительного движения и при диаметре оболочки нагревателей $D = 13$ мм.

Экспериментально-исследовательские работы подтвердили, что с достаточной для инженерных расчетов точностью номограммы применимы для расчета установок с тэнами, предназначенных для нагрева наиболее часто встречаемых в практике марок масел.

Слева от номограммы размещена шкала разностей температур между оболочками тэнов и маслом $\Delta t'$, а в нижней части — шкала $\alpha_{МК}$. В соответствии с этими шкалами и уравнениями подобия на номограмме нанесена серия кривых $t_{cp} = \text{const}$ (наклон вправо). Кроме того, в соответствии с (69) на номограмме нанесена сетка кривых $p_w = \text{const}$ (наклон влево).

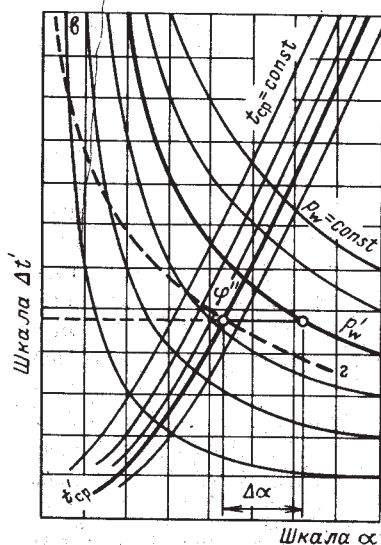
При нагреве других марок масел и ином диаметре оболочки значение коэффициента теплоотдачи можно выразить через коэффициент теплоотдачи от тэна диаметром 13 мм, работающего в масле МК, по формуле

$$\alpha = \alpha_{МК} + \Delta\alpha, \quad (73)$$

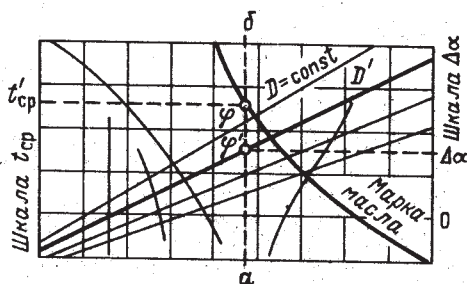
где $\Delta\alpha$ — поправка, зависящая от вида нагревательной среды, ее температуры и диаметра оболочки нагревателя.

Для нахождения поправки $\Delta\alpha$ разработана дополнительная номограмма (рис. П.10). Слева от номограммы размещена шкала t_{cp} , справа — шкала $\Delta\alpha$. На номограмме нанесена серия прямых линий $D = \text{const}$ и линии, соответствующие наиболее распространенным видам масел.

Схему пользования номограммами иллюстрируют рис. 49, 50. Для расчета температуры поверхности тэнов с диаметром оболочки $D = D'$, работающих в масле при известных значениях удельной поверхностной мощности $p_w = p'_w$, и температуры нагрева масла $t_{cp} = t'_{cp}$ по номограмме $\Delta\alpha = f(t_{cp}; D; \text{марка масла})$ на линии (рис. 50), относящейся к маслу заданной марки, находят точку ϕ с ординатой t'_{cp} . Проводят через эту точку вертикаль ab и на ее пересечении с линией D' находят точку ϕ' . Поправка $\Delta\alpha$ определяется как ордината точки ϕ' по шкале $\Delta\alpha$.



Р и с. 49. Схема пользования номограммой $\Delta t'; p_w$ для масел



Р и с. 50. Схема пользования номограммой $\Delta \alpha = f(t_{cp}; D; \text{тип масел})$

Затем на номограмме (рис.49) находят на кривой t'_{cp} точку φ'' , отстоящую на горизонтали от линии p'_w на расстоянии поправки $\Delta \alpha$ (влево при положительном и вправо при отрицательном значении поправки), ордината которой по шкале $\Delta t'$ покажет разницу температур между поверхностью тэна и нагреваемым маслом. Затем по (72) рассчитывают температуру оболочки.

Так как все номограммы в прилож. 3 составлены в едином масштабе $\alpha_{МК}$ и $\Delta \alpha$, то при определении $\Delta t'$ по номограмме (рис. П.8) можно пользоваться приемом, описанным в правилах пользования аналогичной номограммой, составленной для расчета тэнов, работающих в воздушной среде.

Пример 9. Требуется определить температуру нагрева оболочки горизонтально расположенных тэнов, работающих в среде трансформаторного масла.

Исходные данные для расчета:

$$P_L = 500 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1}; \quad D = 0,01 \text{ м}; \quad t_{cp} = 80^\circ \text{C}.$$

Расчет

1. По номограмме (рис. П.10,а) для трансформаторного масла при $t_{cp} = 80^\circ \text{C}$ и $D = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ находят $\Delta \alpha \approx 60 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$.
2. В соответствии с (68)

$$p_w = 0,32 \cdot 500 / 0,01 = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

3. По номограмме (рис. П.8) для $t_{\text{ср}} = 80^\circ\text{C}$; $p_w = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $\Delta\alpha = 60 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ определяют $\Delta t' \approx 65^\circ\text{C}$.

4. По (72)

$$t_{\text{T}} = 80 + 65 = 145^\circ\text{C}.$$

Номограммы для определения температуры поверхности вертикально расположенных нагревателей, работающих в масляных средах (с большими объемами масла). Принципы построения основной и дополнительной расчетных номограмм для тэнов, вертикально расположенных в масляных средах (рис. П.9 и П.10, б, прилож 3), те же, что и для тэнов, расположенных горизонтально. Различие состоит в том, что определяющим размером при расчете коэффициента теплоотдачи является не диаметр оболочки нагревателей, а высота вертикального участка их активной части H . В связи с этим на дополнительной номограмме вместо линий $D = \text{const}$ нанесены линии $H = \text{const}$. В остальном номограммы и правила пользования ими сходны и дополнительных пояснений не требуют.

Пример 10. Требуется определить температуру нагрева оболочки вертикально расположенных тэнов, работающих в среде хлопкового масла.

Исходные данные для расчета:

$$p_w = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}; \quad t_{\text{ср}} = 120^\circ\text{C}; \quad H = 0,45 \text{ м}.$$

Расчет

1. По номограмме (рис. П.10, б) для хлопкового масла при $t_{\text{ср}} = 120^\circ\text{C}$ и $H = 0,45 \text{ м}$ находят $\Delta\alpha \approx 75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

2. По номограмме (рис. П.9) для $t_{\text{ср}} = 120^\circ\text{C}$; $p_w = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $\Delta\alpha = 75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ определяют $\Delta t \approx 56^\circ\text{C}$.

3. В соответствии с (72)

$$t_{\text{T}} = 120 + 56 = 176^\circ\text{C}.$$

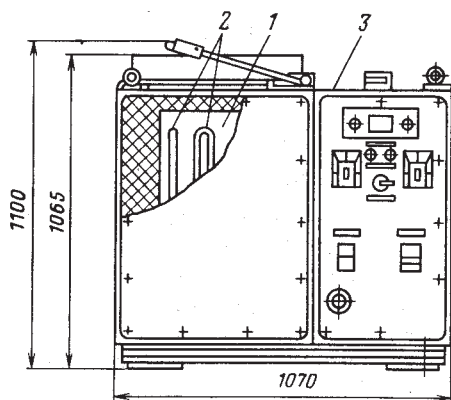
Краткие рекомендации по выбору тэнов для конкретных установок приведены в [11].

19. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ТЭНАМИ

Нагревательные устройства с тэнами по конструкции и назначению отличаются большим разнообразием (сантехнические и технологические калориферы, проточные и емкостные водонагреватели промышленного и бытового назначения, различные бытовые приборы для приготовления пищи, обогреватели для отопления помещений, разнообразные виды электропечей, ванны для разогрева и плавления металлов, селитры, растворов щелочей, кислот и т.п.).

Р и с. 51. Электропечь
СШО-3.2.3.2.5/3,5И1:

1 — рабочая камера;
2 — тэны; 3 — прибор-
ный отсек



Рассмотрим примеры кон-
струкций электронагреватель-
ных устройств с тэнами.

Электропечь сопротивления шахтная типа СШО-3,2.3.2.5/3,5-И1 пред-
назначена для сушки и прокатки изделий до 350°C при эксплуатации
в стационарных или передвижных установках (рис. 51).

Технические данные печи: мощность 6 кВт, напряжение 220 В, раз-
меры рабочего пространства (длина, ширина, высота), м: $0,32 \times 0,32 \times$
 $\times 0,5$, масса 230 кг.

Электропечь разделена на два каркаса. В одном каркасе находит-
ся футерованная рабочая камера, в другом — приборный отсек с сило-
вым, контрольным и пускорегулирующим электрооборудованием. На-
гревательная камера состоит из наружного и внутреннего металлических
кожухов, между которыми заложена теплоизоляция. На внутренних боко-
вых стенках и на дне внутреннего кожуха камеры крепятся тэны. Верх-
няя крышка поднимается ручкой рычажного механизма подъема. Регу-
лирование температуры в рабочем пространстве осуществляется при
помощи dilatометрического терморегулятора, рабочая часть которого
вводится в рабочее пространство рабочей камеры. Регулируемую мощ-
ность включаемых групп нагревателей (1; 3; 4; 6 кВт) задают с по-
мощью универсальных переключателей.

Электропечь сопротивления камерная с выдвижным подом типа
СДОС предназначена для сушки изделий при температуре до 250°C
после пропитки их лаками. Для получения достаточной интенсивности
воздухообмена электропечь снабжена печными вентиляторами. Мощ-
ности размерного ряда электропечей от 70 до 335 кВт. Разработчик
электропечей — Харьковское отделение ВНИИЭТО.

Электропечи серии ПЭТ предназначены для обогрева внутренних
помещений. Основные параметры и размеры электропечей указаны в
табл. 14.

При последовательном электрическом соединении нескольких элект-
ропечей, например четырех ПЭТ-1, допускается их эксплуатация в элект-
росети с номинальным напряжением 3000 В. Электропечи предназна-
чены для работы в условиях вибрации с частотой до 50 Гц; допуска-

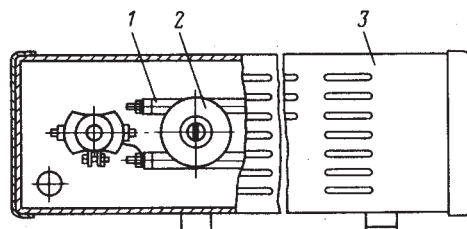
Т а б л и ц а 14. Основные параметры и размеры электропечей типа ПЭТ

Тип печи	Номинальное напряжение, В	Номинальная мощность, Вт	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг
ПЭТ-1 ПЭТ-2	750 380	1000	656	246	172	7
ПЭТ-3 ПЭТ-4	110 220					4,8
ПЭТ-5 ПЭТ-6	500 600	500	625	157	120	4,5
ПЭТ-7	220	750				3,5
ПЭТ-8	825	1000				4,5
ПЭТ-9	220	500				3,5

ется ударная нагрузка с ускорением 3g. В электропечах типа ПЭТ-1, ПЭТ-2, ПЭТ-5, ПЭТ-6, ПЭТ-8 соединенные последовательно тэны смонтированы на изоляторах, помещенных в кожух из листовой перфорированной стали (рис. 52). В электропечах типа ПЭТ-3, ПЭТ-4, ПЭТ-7 и ПЭТ-9 тэны смонтированы на металлических скобах, и в этом случае применение ПЭТ на высокое напряжение не допускается.

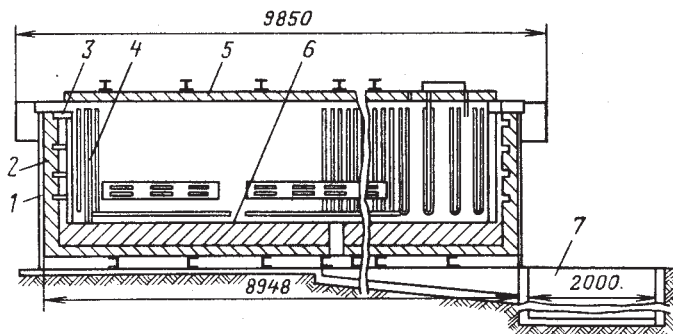
Селитровая ванна типа СВЩ 12.80.12/5-Т предназначена для термической обработки металлических изделий до температуры 550 °С (рис. 53). Распределение и нагрев селитры осуществляются с помощью тэнов, расположенных на внутренних боковых стенках ванны. Установленная мощность ванны 290 кВт, напряжение 220 В, рабочая среда 50 % NaNO₃ + 50 % KNO₃, объем расплава 16 м³, размеры рабочего пространства ванны (длина, ширина, глубина), м: 8 × 1,2 × 2. Футерованная крышка ванны приводится в движение специальными механизмами.

Электрованна типа ОКБ-2162 предназначена для отпуска в масле валков трубозлектросварочных станов и других подобных деталей (рис. 54). Технические данные ванны: мощность 96 кВт, напряжение 380 В (3 фазы), максимальная рабочая температура 260 °С, размеры рабочего пространства, м: 2,5 × 2,1 × 2,8, масса электрованны 7,8 т.



Р и с. 52. Электропечь ПЭТ-1:

1 — тэн; 2 — изолятор; 3 — кожух

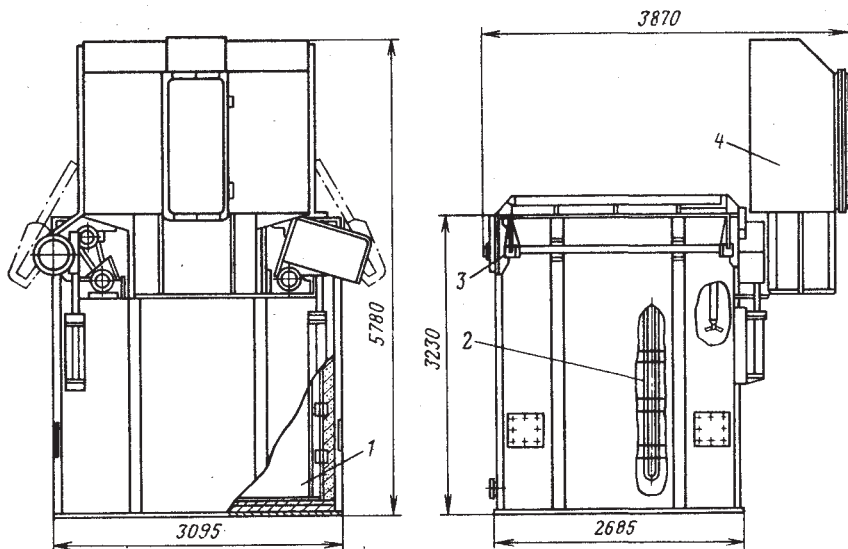


Р и с. 53. Селитровая ванна СВЩ-12.80.12/5-Т:

1 – каркас; 2 – футеровка; 3 – металлический тигель; 4 – тэн; 5 – крышка; 6 – поддон; 7 – приямок для аварийного слива расплава

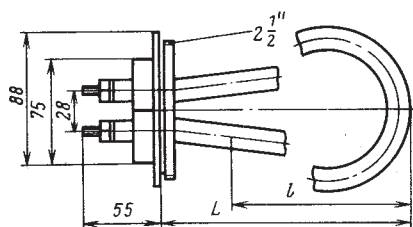
Масло в ванне подогревают 12 тэнами мощностью 8 кВт каждый. Включение и отключение тэнов автоматическое. Температуру масла в ванне выравнивают с помощью двух мешалок. Пары масла удаляются с помощью вентиляционного устройства.

Электронагревательные секции серии СЭМ предназначены для нагрева масел до температуры 80 °С. В табл. 15 и на рис. 55 указаны типы, основные параметры и размеры секций.



Р и с. 54. Электрованна масляная ОКБ-2162:

1 – бак; 2 – тэн; 3 – механизм открывания крышки; 4 – вентиляционное устройство



Р и с. 55. Электродвигательная секция СЭМ

Т а б л и ц а 15. Основные параметры и размеры электронагревательных секций

Тип секций	Номинальное напряжение, В	Номинальная мощность, Вт	Установочная длина, мм, не более	Активная длина, мм, не более	Масса, кг, не более
СЭМ-1	110	1,50	700	625	3,5
СЭМ-3	220	3,75	700	625	3,5
СЭВ-3	220	3,75	425	375	2,5

Электрокалориферные установки серии СФОА с центробежным вентилятором предназначены для подогрева воздуха до 50°C в системах вентиляции сельскохозяйственных помещений и промышленных зданий. В комплект установки входят электрокалорифер типа СФО, в котором нагревателями являются тэны с алюминиевым оребрением, центробежный вентилятор и шкаф с аппаратурой автоматического управления. Заданная температура входящего в помещение воздуха поддерживается автоматически. Схема блокировок установки предусматривает отключение электрокалорифера при отключении центробежного

Т а б л и ц а 16. Технические данные электрокалориферов СФО

Параметр	Электрокалорифер			
	СФО-5/1Т-И2	СФО-10/1Т-И2	СФО-16/1Т-И2	СФО-25/1Т-И2
Мощность, 10^3 Вт	4,8	9,6	15	22,5
Подача воздуха, $\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$, не менее	700	900	1700	2000
Перепад температур выходящего и входящего воздуха, $^{\circ}\text{C}$, не более	25	40	35	45
Число секций электрических	1	2	2	3
Мощность секций, $10^3 \cdot \text{Вт}$	4,8	4,8	7,5	7,5
Температура выходящего воздуха, $^{\circ}\text{C}$, не более				100

вентилятора, а также при повышении температуры на поверхности обогрева тэна до 180 °С.

Параметры разработанных ВНИИЭТО электрокалориферов СФО, входящих в установки СФОА, приведены в табл. 16. Электрокалориферы могут работать на трех ступенях: 1; 2/3 и 1/3 мощности.

Во ВНИИЭТО разработаны установки с осевыми вентиляторами (установленная мощность калориферов 10 и 16 кВт), предназначенные для нагрева воздуха в овощехранилищах и промышленных зданиях, где требуется большее количество приточного воздуха при сравнительно низкой температуре. Электрокалориферы с осевыми вентиляторами крепятся к колонне или стене на кронштейнах.

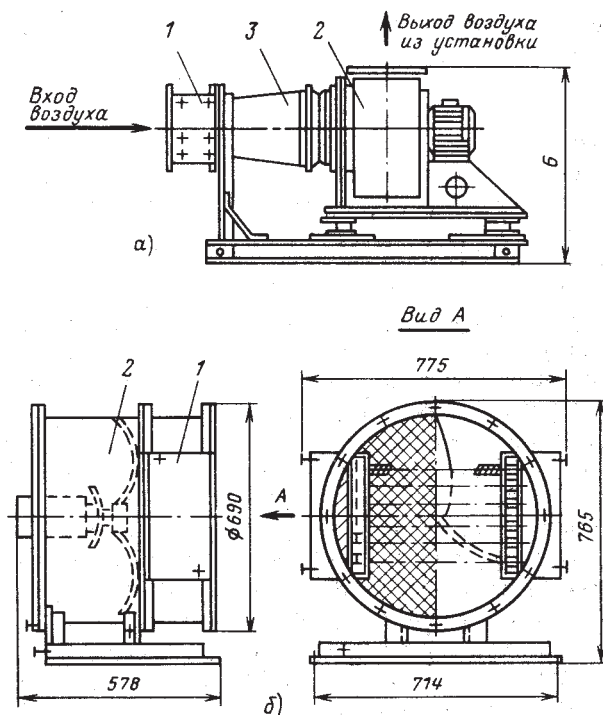
Общий вид электрокалориферных установок СФОА изображен на рис. 56.

Инфракрасный излучатель типа ОКБ-1376А предназначен для обогрева молодняка животных и птиц на разных стадиях их роста. Излучатель представляет собой конусный отражатель с теплоизоляцией, в который вмонтированы три тэна; он может включаться на одну из трех ступеней мощности; подвеска излучателя регулируется по высоте. В зависимости от нужной интенсивности облучения тэны могут поодиночке отключаться (рис. 57).

Электрошкафы типа СНОЛ-3,5,3,5,5/3-ИЗ, нагревательными элементами в которых являются тэны, получили широкое распространение для сушки изделий в лабораторных условиях. Электрошкафы обеспечивают диапазон автоматического регулирования температуры от 50 до 350 °С. Точность автоматического регулирования при номинальной температуре в установившемся тепловом режиме ± 2 °С.

СФО

СФО-40/1Т-И2	СФО-60/1Т-И2	СФО-100/1Т-И2	СФО-160/1Т-И2	СФО-250/1Т-И2
45 3000	67,5 4000	90 5000	157,5 7500	245,5 11 500
55	65	70	85	90
3	3	3	3	3
15	22,5	30	52,5	82,5



Р и с. 5.6. Электрокалориферные установки с центробежным (а) и осевым (б) вентиляторами:

1 — электрокалорифер; 2 — вентилятор; 3 — переходник

Для стерилизации паром материалов, применяемых в медицинской и лабораторной практике, используют автоклавы типа АГН. Температура среды в стерилизационной камере при максимальном давлении $1,96 \times 10^5$ Па не превышает 132°C . Нагрев рабочего пространства (диаметр 260 мм, длина 420 мм) осуществляется тэнами.

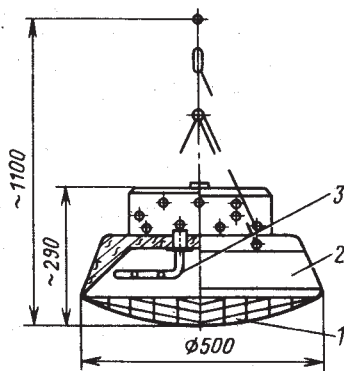
В бытовых электронагревательных приборах тэны применяют в электроконвекторах, электротепловентиляторах, электрокаминах, электрорадиаторах, электроутюгах, грилях, электрочайниках, электроводонагревателях и др.

В последнее время резко возросло применение тэнов в бытовых электроплитах. Плиты с тэнами изготавливают как настольного, так и напольного исполнения. К электроплитам настольного исполнения относятся: одноконфорочная электроплита "Нева-110" мощностью 10^3 Вт с пределами регулирования от 15 до 100 % мощности, диаметр конфорки 145 мм, масса не более 2,6 кг; двухконфорочные электроплитки "Россиянка" и "Актай-1" мощностью по $2 \cdot 10^3$ Вт. Мощность конфорок регулируется пятиступенчатым переключателем.

Рис. 57. Инфракрасный излучатель ОКБ-1376А:

1 — сетка; 2 — кожух; 3 — тэн

Электроплита напольная "Мечта-6" выпускается в двух исполнениях: с бесступенчатым и со ступенчатым регулированием мощности. Электроплита представляет собой конструкцию, выполненную из листовой стали, и состоит из плиты с двумя тэнами-конфорками мощностью по 10^3 Вт, панели управления, жарочного и выдвижного шкафов. Жарочный шкаф обогревается тремя тэнами общей мощностью $1,4 \cdot 10^3$ Вт. Габаритные размеры электроплиты: высота 850 мм, ширина 500 мм, глубина 430 мм, масса не более 37 кг.



Примером устройства с тэнами специального назначения может служить блок трубчатых электронагревателей ТЭНБ-2970.3.13/90ПЗ80, который предназначен для поддержания температуры воды в заданном режиме в компенсаторе объема АЭС. Установленная мощность блока 90 кВт, напряжение 380 В, температура нагрева воды 350°C , рабочее давление среды $1,57 \cdot 10^7$ Па, масса 132 кг. Блок содержит девять тэнов, приваренных к фланцу.

Глава пятая

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТЭНОВ

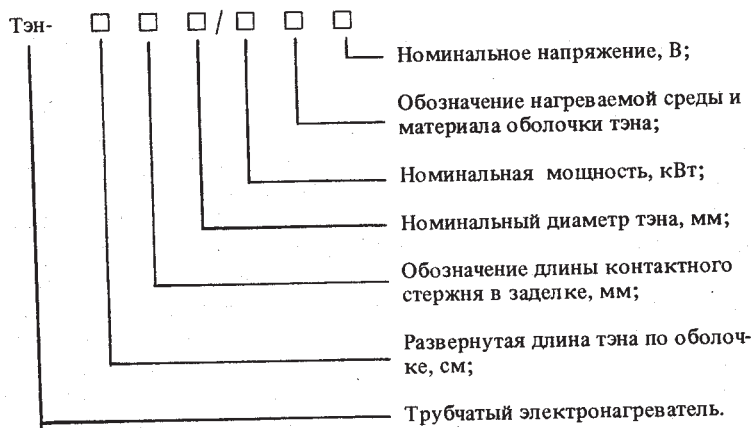
20. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МОНТАЖУ ТЭНОВ

При монтаже тэнов необходимо руководствоваться указаниями, содержащимися в паспорте и инструкции по эксплуатации. Краткие рекомендации по монтажу приведены в каталоге 12.30—09-86.

Перед монтажом тэнов необходимо проверить соответствие их внешнего вида, основных параметров и размеров требованиям, изложенным в нормативно-технической документации (стандарты, технические условия, эксплуатационная документация).

При внешнем осмотре тэна рекомендуется обязательная проверка на соответствие его маркировки, указанной в паспорте, поставляемом с каждой партией тэнов, а также на соответствие этих параметров проектным данным нагревательной установки, в которой монтируется тэн. Конкретная расшифровка условного обозначения типа тэна приводится в нормативно-технической документации, однако для всех типов тэнов общего назначения применяется следующее единое обозначение.

Структура условного обозначения тэна:



Расшифровка условного обозначения нагреваемой среды и материала оболочки приведена в табл. 1, а длины контактных стержней в заделке (пассивная часть нагревателя на каждом его конце) — в § 3.

При отсутствии паспорта проверку соответствия параметров тэна определяют по условному обозначению (маркировке), нанесенному на одном из концов оболочки нагревателя (маркировка наносится, как правило, методом клеймения или накатки).

При внешнем осмотре определяют отсутствие механических повреждений оболочки (трещины, вмятины и др.), состояние поверхности изоляторов (отсутствие сколов, трещин и загрязнений поверхности), целостность контактных соединений для внешнего токоподвода нагревателей (прочность соединения контактного стержня с "флажком" или целостность резьбы на контактном стержне), отсутствие отогнутых концов контактного стержня, прочность заделки контактного стержня (при приложении крутящего момента на контактный стержень с усилием, не превышающим скручивания контактного стержня по сечению, он не должен проворачиваться или перемещаться в осевом направлении в заделке), а также отсутствие загрязнений на видимой части герметика тэна.

При обнаружении трещин или глубоких рисок и царапин на оболочке тэна необходимо проверить целостность оболочки, для чего тэн погружается в подкисленную воду (с добавкой 2–3% соляной, серной или азотной кислот на объем воды) и выдерживается в ней в течение 3 ч. Концы оболочки при этом должны выступать над поверхностью жидкости на 5–10 мм; необходимо исключить попадание капель подкисленной жидкости в торцы тэна. Сопротивление изоляции тэна в холодном состоянии после выдержки не должно снижаться более чем на 50% от измеренного значения сопротивления изоляции до погружения в под-

кисленную воду, но не должно быть ниже $5 \cdot 10^5$ Ом (сопротивление изоляции измеряют ручным или электронным мегаомметром напряжением 500–1000 В). Если это условие не выполняется, тэн должен быть забракован.

Загрязнения, обнаруженные на поверхности изолятора, необходимо удалить, не допуская повреждения изолятора и герметика (например, при наличии глазурованного изолятора даже незначительное нарушение глазури может привести к значительному повышению влагопоглощения изолятора, снижению электрического сопротивления изоляции тэна и возможному электрическому пробое по поверхности изоляции).

При значительном отгибании концов контактного стержня тэна от оси появляется большая вероятность нарушения герметичности нагревателя, что при условии повышенной относительной влажности окружающей среды (80–98%) и нахождении тэна в отключенном состоянии приводит к резкому снижению его электрической изоляции и, следовательно, к нарушению электро- и пожаробезопасности, а также к снижению его надежности (срока службы). Проверка целостности узла герметизации тэна проводится, как правило, в климатической камере при относительной влажности 92–98% и температуре 20–35 °С с выдержкой в течение 48 ч. Допускается при отсутствии климатической камеры осуществлять контроль целостности узла герметизации погружением тэна или узлов герметизации тэна в воду и выдержкой в воде в течение 2 ч.

После выдержки тэна в климатической камере или воде его торцы протирают фильтровальной бумагой и проверяют сопротивление изоляции тэна в холодном состоянии. Значение сопротивления изоляции при этом должно быть не менее $5 \cdot 10^5$ Ом. После выдержки тэна в течение не более 6 ч в сушильном шкафу с температурой 120–150 °С значение сопротивления изоляции должно восстанавливаться до значения не менее $2 \cdot 10^7$ Ом. Если сопротивление изоляции не удовлетворяет указанным условиям, включение тэна в эксплуатацию по соображениям электробезопасности и пожаробезопасности не допускается. Восстановление работоспособности такого нагревателя должно, как правило, производиться в условиях и по технологии завода-изготовителя тэнов. Кроме того, при любой доработке электронагревателя (в том числе перегерметизации) потребитель теряет право предъявлять претензии заводу-изготовителю по гарантийному сроку службы тэна. Однако в случае крайней необходимости герметизации тэна у потребителя работоспособность тэна можно восстановить, для этого необходимо:

- 1) извлечь изолятор без повреждения его поверхности и тщательно удалить старый герметик со всей площади внутренней поверхности облочки тэна, поверхности контактного стержня и поверхности периклаза торца тэна. Если тэн был загерметизирован кремнийорганическим лаком, который проникает в периклаз на глубину 2–3 мм, то этот слой периклаза необходимо удалить. Принятые на заводах методы выборки периклаза изложены в § 5;

2) после удаления герметика с обоих концов тэна весь объем периклаза внутри тэна необходимо прокалить при температуре $700-750^{\circ}\text{C}$ в течение 3—4 ч, для чего нагреватель помещают в печь. При отсутствии печи допускается прокалка периклаза за счет тепла, выделяемого ремонтируемым нагревателем после подключения его к электросети. Для этого необходимо практическим путем подобрать значение напряжения питания нагревателя, при котором установившаяся температура рабочей части нагревателя составит $700-800^{\circ}\text{C}$, а температура на его концах — не менее 120°C . Так как ремонтируемый нагреватель имеет низкое значение сопротивления изоляции, напряжение питания, подаваемое для прокалики периклаза, должно быть по возможности минимальным (во избежание электрического пробоя и неисправимого разрушения изоляционного слоя тэна). Для выполнения этих условий рекомендуется подбирать практическим путем такое количество последовательно соединенных и включаемых в электросеть нагревателей, которое при условии возможно близкого расположения нагревателей друг к другу и создания вокруг такого пучка нагревателей теплоизоляционного слоя обеспечит вышеуказанные значения температур в рабочей и торцевой частях тэнов. Признаком восстановления электроизоляционных свойств нагревателя является повышение сопротивления изоляции нагревателя в холодном состоянии до $10^9 - 10^{10}$ Ом и более;

3) произвести герметизацию торцевых частей тэна в полном соответствии с инструкцией завода-изготовителя тэнов (основные операции герметизации изложены в § 5, а применяемые герметики описаны в § 3).

При прокручивании контактного стержня или при перемещении его в осевом направлении тэн должен быть забракован, так как эксплуатация тэна с такими дефектами неизбежно приведет к быстрому выходу его из строя (эти дефекты не допускают подключения нагревателей к электросети).

При нарушении целостности внешних контактных соединений тэнов вопрос его дальнейшего использования определяется в зависимости от степени разрушения с учетом требований надежного электрического контакта между выводом тэна и электрической сетью.

Основные параметры и размеры тэнов перед их монтажом проверяют как по всей номенклатуре параметров, указанных в нормативно-технической документации, так и по сокращенной программе. Рекомендуется в качестве минимальной программы проверить значения сопротивления изоляции в холодном состоянии (описание метода изложено выше), а также отсутствие нарушений электрических соединений с помощью мегаомметра.

После проверки фактических параметров тэна по его обозначению необходимо прежде всего обратить внимание на следующие параметры, которые должны соответствовать проектным характеристикам нагревательного устройства.

1. Нагреваемая среда, для которой предназначен тэн, должна строго соответствовать характеристике среды, предусмотренной по проекту (назначению) нагревательной установки. Например, при применении тэна, предназначенного для эксплуатации в слабых растворах кислот и имеющего высокую удельную поверхностную мощность до $15 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (условное обозначение среды "П"), в нагревательной установке, предназначенной для нагрева неподвижной воздушной среды, для которой удельная поверхностная мощность нагревателя не должна превышать $2,2 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (условное обозначение "С"), срок службы нагревателя, как правило, снижается в несколько сотен раз, а температура на его оболочке может достигать $1\,000^\circ\text{C}$ и более и повлечь за собой короткое замыкание и электротепловой пробой с выбросом расплавленного металла оболочки тэна.

Другим характерным примером несоответствия характеристик нагреваемой среды для нагревателя и нагревательного устройства является применение тэнов, имеющих оболочку из углеродистой стали, для нагрева высокоагрессивных растворов кислот, в которых необходимо применять тэны с оболочкой только из нержавеющей или другой коррозионно-стойкой стали. В этом и подобных случаях, связанных со стойкостью материала оболочки в агрессивных и окислительных средах, неправильное применение типа нагревателей также приводит к резкому сокращению срока службы тэнов.

2. Номинальное напряжение электрической сети должно соответствовать номинальному напряжению нагревателя. Например, при включении нагревателя с номинальным напряжением 220 В к выводам сети с напряжением 380 В выделяемая на рабочей части нагревателя мощность возрастает практически в 3 раза, что, как правило, вызывает аварийный режим и выход из строя нагревателя.

3. Длина контактных стержней в заделке на обоих концах тэна (пассивная часть оболочки тэна) должна быть всегда больше длины того участка нагревательного устройства, которое не является составной частью его рабочего пространства. Соответственно длина рабочей части тэна (активная длина) не должна гарантированно выходить за пределы той части рабочего устройства, в которой поддерживаются параметры нагреваемой среды при любых режимах работы устройства. Например, при нагреве жидких сред активная часть тэна должна во всех случаях при включенном состоянии нагревателя омываться нагреваемой жидкостью. В противном случае (если даже незначительная длина активной части нагревателя окажется выше уровня жидкости, т.е. будет находиться в газовой среде) происходит критическое превышение температуры находящейся над поверхностью жидкости части тэна, и он выходит из строя.

Другим примером неправильного применения нагревателя является такой случай нагрева воздушной среды, когда часть активной длины нагревателя располагается в футеровке (теплоизоляционном слое нагре-

вательного устройства); при этом также резко ухудшается теплоотдача с этого участка активной части нагревателя, что приводит к последствиям, указанным в предыдущем примере. Кроме того, в обоих случаях, как правило, повышается температура в зоне герметика выше допустимой, происходит разгерметизация тэна и резкое снижение его влагозащитных свойств. При проверке соответствия фактической длины пассивной части нагревателя конструкции нагревательного устройства необходимо также учитывать, что допуск на длины как пассивной, так и активной части нагревателя имеет в силу специфики технологического процесса изготовления тэнов большой разброс значений (от 10 до 40 мм и более в зависимости от длины тэна), а также, что проверка фактического допуска на длину пассивной части крайне затруднена и может быть проверена с достаточной достоверностью на рентгеновской установке. С учетом этих обстоятельств необходимо соблюдать соответствие не только номинальных значений активных длин тэнов и размеров рабочего пространства, но и предусматривать соответствующий запас с учетом большого разброса допусков на нагревателях.

В процессе монтажа помимо выполнения указаний, содержащихся в паспорте и инструкции по эксплуатации, целесообразно выполнять следующие рекомендации.

1. Общие рекомендации по монтажу, характерные для всех типов тэнов.

1.1. Необходимо неукоснительно соблюдать условие гарантированного нахождения всей длины активной части тэна в рабочей среде. Для практической проверки выполнения этого условия допускается в необходимых случаях включить на напряжение сети один-два нагревателя без заполнения нагревательного устройства рабочей средой (на открытом воздухе) на короткое время (1–5 мин); при этом тэн, находящийся в условиях уменьшенной теплоотдачи, будет иметь температуру на активной поверхности, значительно превышающую номинальную, и границы активной и пассивной частей можно визуально определить по разной степени нагрева оболочки тэна.

1.2. Расположение параллельных ветвей соседних нагревателей или одного и того же многократно изогнутого тэна, так же как пересечение ветвей нагревателей, должно выполняться без касания активной части оболочки друг к другу с возможно максимальным зазором (рекомендуется не менее одного диаметра оболочки тэна).

1.3. Тэн, как правило, крепят в его пассивной части; при необходимости допускается крепление в активной части, однако при этом не должно быть существенного превышения температуры оболочки в месте крепления. Для выполнения этого условия крепление, как правило, осуществляется за счет применения металлических хомутов, устанавливаемых на ребро с толщиной крепежной пластины в месте ее касания с тэном не более 1–2 мм. Исполнение крепежных хомутов должно исключать оседание посторонних предметов (осадков из жидких раство-

ров, окалины и др.), которые по мере накопления на активной части нагревателя в процессе эксплуатации также приведут к превышению его температуры и выходу из строя. Запрещается крепление тэна с применением электрической и газовой сварки в любой точке цилиндрической части оболочки тэна во избежание прожога и разгерметизации оболочки нагревателя, а также выхода из строя узла герметизации и электроизоляционного наполнителя из-за воздействия высокой температуры.

1.4. При монтаже тэнов общего назначения заземление оболочки нагревателей, имеющих (в состоянии поставки с завода-изготовителя) на концах штуцера, фланцы и крепежные скобки, должно производиться в местах крепления указанной арматуры. При креплении тэна, оснащенного резьбовым штуцером, через уплотняющую неметаллическую прокладку электрический контакт заземления должен находиться с противоположной стороны стенки корпуса нагревательного устройства, т.е. с той стороны, где отсутствуют неметаллические прокладки.

Для заземления нагревателей, не оснащенных крепежной арматурой, электрическое заземление должно осуществляться с помощью хомутов и болтовых зажимов, устанавливаемых только в пассивной части нагревателя; при этом расстояние от торца тэна до узла заземления должно быть минимальным, так как по мере увеличения этого расстояния возрастает температура оболочки, скорость окисления контактных поверхностей и снижается надежность контакта электрического заземления. Категорически запрещается установка заземления на активной части тэна. Конкретные размеры деталей узла заземления тэнов определяются потребителем или организацией, проектирующей нагревательное устройство, с учетом его назначения, электрической мощности, характеристики окружающей среды, токов короткого замыкания электрической сети, к которой подключается нагревательное устройство, и других условий — в полном соответствии с ПУЭ.

1.5. Внешнюю электросеть к контактному стержню тэна подсоединяют с учетом следующих специфических условий работы тэнов:

температура в месте контакта определяется не только джоулевым теплом, выделяемым на переходном сопротивлении контакта, а имеет на 50—100 °С большее значение за счет тепла, поступающего в торец тэна из активной части; это обстоятельство требует обеспечения повышенной надежности контактного соединения, так как практика эксплуатации и статистика выхода тэнов из строя показывают, что отказы нагревателя из-за отгорания контактного стержня в месте его контакта с подводным кабелем составляют до 30% всех видов отказа тэнов;

при затяжке гаек на контактном стержне тэна возможно прокручивание контактного стержня из-за чрезмерно больших усилий затяжки гаек;

при подсоединении подводных кабелей к контактным стержням тэнов нельзя допускать изгибание контактного стержня.

1.6. Изменение формыгиба тэнов или изгибание прямых тэнов у потребителя, в том числе при монтаже, как правило, не допускается, так как при этом теряются гарантии завода-изготовителя нагревателей. Но так как на практике имеют место случаи вынужденной доработки (изменения формыгиба), приведем рекомендации, при выполнении которых доработка не снижает надежности тэнов.

Не допускается изгибание тэнов в месте соединения контактного стержня со спиралью тэна; расстояние от внутреннего конца контактного стержня (находящегося в заделке) до началагиба должно быть не менее 20 мм, а при точном определении места внутреннего конца контактного стержня — не менее 10 мм. Несоблюдение этого требования приводит к снижению электроизоляционных характеристик тэнов или к короткому замыканию контактного стержня на оболочку из-за нарушения соосности контактного стержня и оболочки.

Оболочка тэна на всем участке изгибания должна пройти качественный стабилизирующий отжиг при температуре 850–900 °С для углеродистой стали и 1050–1100 °С для нержавеющей стали в течение 1–1,5 ч. Невыполнение этого условия приводит к образованию микротрещин оболочки, которые в процессе эксплуатации нарушают ее герметичность с неизбежным выходом тэна из строя.

При проведении отжига должны быть приняты надежные меры, исключающие повышение температуры торцов тэнов в зоне узла герметизации выше 150 °С; при невозможности выполнения этого условия необходимо произвести перегерметизацию тэнов.

Производить отжиг с помощью газовой (ацетиленовой) горелки, как правило, не рекомендуется из-за неравномерности нагрева оболочки; применение горелки, с одной стороны, может способствовать некачественному (нестабильному) отжигу с образованием в последующем микротрещин, а с другой — к местному превышению температуры электротехнического периклаза внутри оболочки, вызывающего его потемнение и электрический пробой тэна при эксплуатации.

После отжига тэн изгибают на оправке с требуемым радиусомгиба и с гладкой цилиндрической поверхностью; для обеспечения качественногогиба поверхность оправки должна иметь форму желоба с диаметром, равным диаметру оболочки тэна; прижимать оболочку тэна к оправке необходимо с помощью подвижного ролика, имеющего аналогичный желоб. Радиусгиба тэна должен быть по возможности максимальным, но не менее 3–5 диаметров оболочки тэна.

После завершения всех операций гибки тэна необходимо проверить герметичность оболочки и узла герметизации, как указано в § 20.

1.7. Так как тэн является комплектующим изделием, то защита открытых токоведущих частей его от прикосновения обслуживающим персоналом, а также от воздействия различных факторов окружающей среды (брызги воды, пыль и др.) обеспечивается в составе нагревательного устройства и конструктивно выполняется, как правило, для одной

или нескольких групп тэнов; при монтаже нагревателей это условие должно выполняться в полном соответствии с конструкторской документацией на нагревательное устройство с соблюдением всех требований ПУЭ.

2. Рекомендации по монтажу тэнов, предназначенных для нагрева жидких сред.

2.1. Характерной особенностью при монтаже таких тэнов является требование плотного соединения крепежной арматуры тэнов в проходном отверстии нагревательного устройства; при расположении узла крепления ниже уровня жидкости нагревательного устройства неплотное соединение (неплотность чаще всего проявляется в процессе эксплуатации нагревательного устройства за счет старения и низкого качества материала прокладки или неправильной затяжки арматуры) вызывает течь жидкости, при которой капли, стекая по штуцеру тэна, попадают в его торцевую полость и по мере скопления и загрязнения пылью окружающего воздуха нередко приводят к электрическому пробую.

2.2. Правила эксплуатации тэнов, предназначенных для нагрева жидких сред, предусматривают периодическую чистку оболочки от накипи и от осевших на ней различных частиц, находящихся в нагреваемой жидкости во взвешенном состоянии (а в масляных средах — от коксовых отложений). Поэтому при монтаже тэнов необходимо стремиться к такому их расположению, чтобы, во-первых, сократить до минимума участки активной поверхности нагревателей, расположенных горизонтально или под небольшим углом к горизонтالي (при вертикальном расположении скорость оседания на поверхности тэна различных частиц уменьшается), во-вторых, обеспечить свободный доступ для чистки активной поверхности всех тэнов по всей ее площади или удобства демонтажа тэнов для очистки поверхности вне нагревательного устройства.

2.3. При нагреве жидких сред, используемых для термообработки (селитровые ванны), раздачи жидких цветных металлов (ванны для плавки свинца, типографских сплавов), химической очистки деталей машиностроения (кислотные и щелочные ванны) и др., монтаж тэнов отличается следующими особенностями:

между дном ванны и нижней точкой активной поверхности тэнов должен оставаться зазор, достаточный для оседания на дне различных шламов, окалины, твердых частиц и других предметов, которые за период между чистками ванны не должны достигать активной поверхности тэнов во избежание превышения температуры и выхода из строя нагревателей;

расположение тэнов и электрическая схема их питания должны быть такими, чтобы при загрузке новых порций расплавляемого материала, имеющего в холодном состоянии твердую форму (чушек свинца, кусков селитры и т.п.), вся активная поверхность тэнов находилась в зоне ранее расплавленного и плотно прилегающего к нагревателям материала,

а если это условие обеспечить не удастся, то в начальный период расплавления кускообразного материала необходимо включать нагреватели на пониженное напряжение вплоть до периода его расплавления — во избежание превышения температуры тэнов;

нагреватели должны быть защищены от внешних ударных и других механических воздействий, если таковые предусмотрены по технологическому процессу (бросание в жидкий расплав твердого кускового материала, касание термообрабатываемой проволокой, непрерывно протаскиваемой через селитровую ванну).

3. Особенности монтажа нагревателей, предназначенных для нагрева воздушных сред.

3.1. В устройствах, предназначенных для нагрева подвижного воздуха, монтаж нагревателей должен обеспечивать равномерную скорость обдува всех тэнов; не допускается наличие застойных зон или участков, так как в противных случаях тэны в них будут перегреваться из-за снижения теплосъема.

3.2. В устройствах, где тэны имеют повышенную температуру (500 °C и более) и в которых преобладающей является передача тепла излучением, крепление тэнов должно исключать возможность их провисания при нагреве, не допускать малого расстояния между активными поверхностями и экранирование этих поверхностей конструктивными элементами нагревательного устройства.

21. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭНОВ

В процессе эксплуатации тэнов обслуживающий персонал должен обращать внимание на следующее:

постоянно следить за состоянием контактных стержней, крепежных деталей и электрических проводов, не допускается загрязнение и ослабление соединения. Подтягивать контактные гайки следует осторожно, с тем чтобы не разрушить изоляторы, резьбу, а также не допустить повертывание контактных стержней в корпусе тэна;

обеспечивать защиту узлов герметизации тэнов от теплового потока так, чтобы температура на торцах оболочки не превышала 100 °C для герметиков на основе эпоксидных компаундов и 150 °C для остальных видов герметиков. При более высоких температурах происходит резкое ухудшение качества применяемых в тэнах герметиков, что приводит к падению сопротивления изоляции в периоды перерывов в работе тэнов и в дальнейшем выходу их из строя, вызванному резким увеличением токов утечки и коротким замыканием на корпус;

в начальный период эксплуатации, а также в тех случаях, когда меняются параметры нагревателей (замена на тэны другой мощности, длины, удельной поверхностной мощности) или параметры нагревательного устройства (например, скорость подвижного воздуха), необходимо проверить температуру активной части тэнов в наиболее нагретых точках. Максимальная температура на оболочке тэнов для газовых

сред не должна превышать значения, предусмотренного по проекту нагревательного устройства, которое должно составлять для тэнов с оболочкой из углеродистой стали не более 450 °С, а с оболочкой из нержавеющей стали (12Х18Н10Т) не более 650 °С (для специальных устройств с более низким назначенным ресурсом допускается 750 °С).

Температура на активной части оболочки тэнов измеряется, как правило, термоэлектрическим преобразователем со снятым металлическим или керамическим чехлом; горячий спай преобразователя рекомендуется приварить к оболочке тэнов с помощью контактной сварки, а при ее отсутствии плотно прижать к оболочке с помощью хомута, изготовленного из одного витка тонкой проволоки (диаметром 0,2–0,3 мм) высокого сопротивления.

При измерении температуры в зоне пассивной части тэна велика вероятность относительно большой погрешности, которая может оказаться причиной фактического завышения температуры в зоне герметика и его выхода из строя. Поэтому измерение этой температуры рекомендуется проводить особенно тщательно с соблюдением следующих условий:

термопреобразователь — хромель-копелевый, диаметр проволоки термоэлектродов не более 0,2 мм;

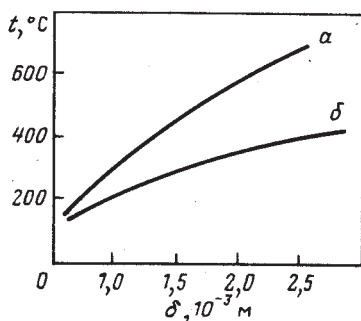
измерение необходимо производить на оболочке на расстоянии 5–10 мм от конца тэна (большее значение относится к тэнам диаметром 13–16 мм);

при измерении температуры обязательно учитывать все поправки на погрешности, вносимые температурами холодного спая, гальванометра и др.

Перед включением устройства после его длительного пребывания в отключенном состоянии рекомендуется проверить сопротивление изоляции тэнов в холодном состоянии и, если оно будет менее 10⁶ Ом, провести подсушку тэнов. Это мероприятие нередко предотвращает преждевременный выход из строя нагревателей, которые после подсушки могут работать длительное время.

Подсушку тэнов рекомендуется проводить при температуре на активной части не менее 100 °С с обязательным условием, чтобы температура в зоне узла герметизации была не менее 100 и не более 120 °С. Время подсушки составляет, как правило, не менее 10 ч.

Для тэнов, работающих в жидких средах, необходим периодический контроль толщины слоя накипи и различных частиц, осаждающихся на активной поверхности нагревателей. Как видно из графика, приведенного на рис. 58, температура на оболочке нагревателя в зависимости от толщины слоя накипи и удельной поверхностной мощности на оболочке тэнов возрастает в несколько раз, что сокращает срок службы нагревателей на несколько тысяч часов. На практике в зависимости от жесткости нагреваемой воды слой накипи и различных осадков толщиной 5 мм и более может образоваться в течение 3–5 мес. В этом случае срок



Р и с. 58. Зависимость температуры оболочки t от толщины слоя накипи δ для тэнов с удельной поверхностной мощностью $12 \times 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (а) и $6 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (б)

службы тэнов может сократиться в 3–5 раз. В связи с этим обеспечение паспортной долговечности тэнов при нагреве жидких сред требует систематического контроля накипи на оболочке и обязательной ее очистки.

Толщина слоя не должна превышать 1 мм. Очистка поверхности от рыхлой накипи производится, как правило, механическим путем. Если накипь удалить трудно, то допустима химическая очистка с условием сохранения толщины металла оболочки тэна.

В процессе эксплуатации имеют место случаи отгорания соединения контактного стержня с питающим кабелем, при этом нагревательный элемент и другие узлы тэна, как правило, сохраняют работоспособность в течение длительного времени, т.е. работоспособность нагревателя может быть восстановлена. Для восстановления работоспособности тэна необходимо проверить наличие электрической цепи между контактными стержнями на обоих концах нагревателя (включая стержень с обгоревшим контактом), сохранность узлов герметизации тэна и приступить к ремонту контактного соединения на выводном стержне: осторожно снять изолятор, очистить металлические поверхности и торцевую часть тэна с периклазом от герметика, удалив слой периклаза на глубину 1–2 мм, приварить встык к контактному стержню тэна ранее приготовленную шпильку (из того же материала, с тем же диаметром, что и контактный стержень тэна) с нарезанной резьбой, зачистить место сварки, заново загерметизировать торец тэна, установить изолятор и проверить качество герметизации тэна.

При эксплуатации тэнов, устанавливаемых в селитровых ваннах, и необходимости включения нагревателей на пониженное напряжение в период расплавления селитры рекомендуется применять три схемы соединения на пониженное напряжение:

схему с питанием от понижающего трансформатора, имеющего ступени регулирования напряжения от 0,6 до номинального напряжения сети;

схему, при которой три равных группы тэнов подключаются к электросети в номинальном режиме на линейное напряжение, а в период разогрева — на фазовое напряжение сети (с помощью переключения со звезды на треугольник и наоборот);

схему, при которой шесть равных по мощности групп тэнов включаются в номинальном режиме в каждой фазе по две группы параллельно, а в период разогрева — по две последовательно соединенные группы.

Указанные переключения тэнов необходимо производить только в той части ванны, которая заполняется кусковым материалом. Во избежание чрезмерного увеличения потерь времени на разогрев ванны рекомендуется повышать суммарную установленную мощность тэнов на 30–60% больше номинальной для включения их только в период разогрева.

22. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При эксплуатации тэнов и изделий на их основе необходимо принимать меры для защиты обслуживающего персонала от опасности получения травм.

Опасности поражения электрическим током. Тэны имеют неизолированные токоведущие части (контактные стержни), с которыми возможен контакт человека при выполнении им технологических операций — непосредственно или через инструмент. В связи с этим защита неизолированных токоведущих частей от прикосновения к ним обслуживающего персонала должна обеспечиваться конструкцией нагревательного устройства и инструкциями по эксплуатации, разрабатываемыми предприятиями, проектирующими и эксплуатирующими нагревательные устройства. Кроме того, при снижении сопротивления изоляции тэнов в процессе их хранения и эксплуатации создается опасность поражения током за счет возрастания токов утечки или электрического пробоя между спиралью и оболочкой, в связи с чем оболочка тэна или металлические конструкции нагревательного устройства должны быть надежно заземлены. Необходимость заземления оболочек тэнов и схема заземления всего нагревательного устройства определяются разработчиком этого устройства.

Для нагревательных устройств, в которых не может быть применено защитное заземление, таких, как нагревательные бытовые и коммунальные электроприборы, используемые в помещениях, не имеющих защитного заземления, конструкция нагревательного устройства должна предусматривать наличие электрически изолированных деталей, предназначенных для обслуживания устройства при включенных в электрическую сеть тэнах (изолирующих ручек и др.). Кроме того, такие нагревательные устройства необходимо снабжать подробной инструкцией по безопасному обслуживанию, учитывающей специфику электроизоляционных свойств тэнов.

Особенность электроизоляции тэна заключается в свойстве электроизоляционного наполнителя—периклаза активно поглощать влагу из окружающего воздуха, что сопровождается снижением в сотни и тысячи раз сопротивления изоляции нагревателя. Кроме того, практически все применяемые в отечественных и зарубежных нагревателях герметики для защиты торцевых частей тэнов от проникновения влаги из воздуха в электроизоляционный наполнитель не обладают абсолютной влагонепроницаемостью. В результате тэны, которые выпускаются с завода с

сопротивлением изоляции 100 – 1000 МОм после нахождения их в воздушной среде с относительной влажностью более 80% могут иметь сопротивление изоляции 1–10 МОм, а при наличии малейших дефектов узла герметизации или при нарушении герметичности оболочки — менее 1 МОм.

Тепловые воздействия (ожоги). Эксплуатация изделий с тэнами создает опасность теплового поражения персонала. Возможны ожоги при прикосновении к нагретым оболочкам тэнов и нагретых деталей, температура которых для различных нагревательных устройств составляет 100–750 °С. К ожогам ведут выбросы расплава из плавильных ванн при нарушении технологического процесса. Превышение температуры возможно у открытых дверец нагревательных устройств за счет высокой интенсивности теплоизлучения.

Особую опасность представляет случай электротеплового пробоя, который нередко сопровождается расплавлением оболочки тэнов и выбросом расплавленного металла. Такие случаи могут иметь место после длительного (несколько недель или месяцев) пребывания тэнов в отключенном состоянии в условиях высокой относительной влажности (более 80%); из практики эксплуатации тэнов следует, что случаи выброса расплавленного металла наблюдаются у тэнов с рабочей температурой на оболочке свыше 500 °С. В связи с этим необходимо обеспечивать защиту от прямого попадания расплавленного металла на незащищенные участки тела обслуживающего персонала, а также обращать особое внимание на обеспечение предусмотренных технической документацией климатических условий и способов хранения тэнов, а в условиях эксплуатации — на обеспечение нормальных климатических условий во время длительного пребывания нагревательных устройств в отключенном состоянии.

Пожароопасность. При эксплуатации тэнов и изделий с тэнами пожары могут возникнуть из-за недопустимо высоких температур на поверхности как тэнов, так и изделий, при выбросах расплавленного металла и расплавленных солей, при возгорании масел в закалочных баках и т.д. Возникновение пожара возможно также в случае прожога оболочек тэнов в процессе их эксплуатации с образованием электрической дуги и с выбросом расплавленного металла оболочки. Таким случаям нередко предшествует образование на отдельных участках активной поверхности тэнов зон со значительным повышением температуры (за счет повышения проводимости отдельных участков электроизоляционного наполнителя), что вызывает увеличение тока нагрузки и нагрев подводящего электрокабеля. В связи с этим при обнаружении отдельных участков на рабочей поверхности тэнов с явно выраженным превышением температуры, а также участков с местным утолщением оболочки (на 10–30% больше номинального диаметра) нагреватели должны быть немедленно отключены и демонтированы как негодные для дальнейшей эксплуатации.

Для повышения пожарной безопасности тэнов целесообразно устанавливать на питающей электросети возможно более чувствительную

защиту от повышения токовых нагрузок, обеспечивающую срабатывание защиты электронагревателя до или в начальный период возникновения электрического или электротеплового пробоя. При повышенных требованиях к пожарной безопасности целесообразно устанавливать на группу тэнов серийно выпускаемые устройства контроля токов утечки (например, типа РУД, ЗОУП) с автоматической подачей сигнала от этих устройств на отключение группы тэнов от электросети при достижении тока утечки на любом из тэнов 30 мА.

Отравление. При проведении герметизации тэнов используются токсичные материалы, что требует соблюдения правил техники безопасности и санитарных норм по предельной концентрации вредных паров с обеспечением вентиляции воздуха на участке герметизации и других мер. Так, лак КО-08, широко используемый при герметизации, является пожароопасным и токсичным материалом, что обусловлено свойствами входящего в его состав растворителя — толуола. Предельно допустимая концентрация паров толуола в воздухе рабочей зоны не должна превышать $50 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Температура самовоспламенения толуола 536°C . Пределы взрывоопасной концентрации в смеси с воздухом 1,3–6,7%. При высоких концентрациях пары толуола оказывают на организм человека наркотическое действие, при длительном воздействии низких концентраций толуола возникает раздражение слизистых оболочек. Лица, работающие с лаком, должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты, в том числе спецодеждой, резиновыми перчатками, защитными очками.

Взрывобезопасность нагревательных установок с применением тэнов. При применении любого вида нагревателей (в том числе тэнов) во взрывоопасных средах вопрос о взрывозащищенности рассматривается раздельно: по узлу токоподвода и по активной (греющей) поверхности нагревателей.

Взрывозащищенность по узлу токоподвода нагревателя обеспечивается в соответствии с требованиями ГОСТ 22782.0-81 "Электрооборудование взрывозащищенное" и достигается по аналогии с вводными устройствами различных видов взрывозащищенного электрооборудования за счет применения взрывозащищенных коробок выводов и соответствующего исполнения питающего электрокабеля. Как правило, оснащение одиночного тэна взрывозащищенными коробками выводов по технико-экономическим соображениям нецелесообразно, поэтому заводы-изготовители тэнов одиночные нагреватели с взрывозащищенными коробками выводов не выпускают. В связи с этим взрывозащищенные коробки выводов, устанавливаемые на группы тэнов, разрабатывают и изготавливают разработчики и изготовители нагревательного устройства с согласованием документации в необходимых случаях с головной организацией по взрывозащищенному электрооборудованию — ВНИИВЭ.

Взрывозащищенность по активной поверхности нагревателя может быть достигнута только в ограниченных случаях и достигается за счет применения более сложных и дорогостоящих устройств (см. § 23).

23. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С ТЭНАМИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМИ ДЛЯ НАГРЕВА ВЗРЫВООПАСНЫХ СРЕД

В соответствии с ГОСТ 12.2.020-76 взрывозащищенное электрооборудование в зависимости от области применения подразделяется на следующие группы:

I — рудничное взрывозащищенное электрооборудование, предназначенное для подземных выработок шахт и рудников, опасных по газу или пыли;

II — взрывозащищенное электрооборудование для внутренней и наружной установки, кроме рудничного взрывозащищенного.

Ниже рассмотрены нагревательные устройства, которые могут быть отнесены к группе II.

Специфическим для тэнов условием обеспечения взрывозащищенности в нагревательных установках, где взрывоопасная среда непосредственно контактирует с активной частью оболочки тэна, является абсолютная гарантия условия, что температура на оболочке тэна не превысит предельно допустимую для данной взрывоопасной среды. При нагреве тэнами любой среды, например газообразной, температура на оболочке тэна зависит как от характеристик нагревателя (мощность, удельная поверхностная мощность, форма поверхности и др.), так и от свойств, физического состояния нагреваемой среды, конструкции нагревательного устройства и др. Поэтому в нагревательном устройстве, например, предназначенном для нагрева подвижной газовой смеси, движущейся со скоростью $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, с правильно спроектированными тэнами для заданной взрывоопасной среды с максимально допустимой температурой оболочки, например 300°C , может произойти взрыв только потому, что при снижении скорости движения газообразной среды неизбежно повышается температура на оболочке тэна. Для ряда нагревательных устройств, в которых при номинальном режиме температура оболочки тэнов составляет $250\text{--}300^\circ\text{C}$, при случайных изменениях условий отбора тепла температура оболочки тэна может повыситься до 1000°C (и более), хотя все характеристики и параметры тэнов практически оставались без изменения.

В отличие от нагрева взрывоопасных сред тэнами нагрев их некоторыми другими способами, в частности водяными или паровыми калориферами, не вызывает неизбежного повышения температуры на нагревателях при изменении параметров нагреваемой среды или других факторов, влияющих на условия теплопередачи.

Указанное обстоятельство требует при использовании тэнов для нагрева взрывоопасной среды принятия ряда мер, в том числе специальных для конкретного нагревательного устройства, гарантирующих отключение тэна от сети при изменении заданных параметров сре-

ды, вызывающих повышение температуры оболочки тэна. Кроме того, конструкция нагревательного устройства должна предусматривать меры надежного контроля и при необходимости отключения устройства от сети при изменении параметров окружающей среды по условиям ее взрывоопасности (концентрации взрывоопасной смеси, пределов ее воспламенения, взрываемости и др.).

Наряду с требованиями к обеспечению предельно допустимых параметров нагреваемой среды необходимо принятие ряда мер, исключающих аварийное превышение температуры оболочки тэна, не связанное с состоянием нагреваемой среды (электрический или электротепловой пробой с образованием искры или выбросом расплавленного металла, местное превышение температуры сверх допустимого на отдельных участках оболочки тэна). Эти требования обеспечиваются за счет выполнения особых условий при изготовлении тэнов, а также за счет установки в нагревательном устройстве (на группу или на несколько групп тэнов) аппаратуры для контроля токов утечки и своевременного отключения нагревательного устройства от электросети, исключающего электрический пробой или местное повышение температуры оболочки тэна.

Для выполнения всех указанных условий взрывозащищенности нагревательного устройства необходимо при проектировании, изготовлении и эксплуатации конкретного нагревательного устройства и тэнов, устанавливаемых в этом устройстве, учитывать следующие факторы.

1. Категорию и группу взрывоопасной смеси, которая постоянно присутствует или может присутствовать в нагреваемой среде, условие взрывозащиты, к которому должно быть отнесено нагревательное устройство, и температурный класс, которому должна соответствовать максимальная температура активной поверхности тэна.

Эта классификация необходима для выполнения всех требований комплекса стандартов "Взрывозащищенное и рудничное оборудование" [12] применительно к конкретно разрабатываемому нагревательному устройству.

Классификация взрывоопасных смесей предназначена для получения исходных данных, необходимых при выборе взрывозащищенного электрооборудования (в частности, нагревательного устройства) согласно ГОСТ 12.2.020-76, она распространяется на такие взрывоопасные смеси горючих газов и паров с воздухом, образующиеся в процессе производства во взрывоопасных средах, которые способны взрываться от постороннего источника поджигания, где применяется взрывозащищенное электрооборудование.

По уровню взрывозащиты взрывозащищенное электрооборудование для внутренней и наружной установок подразделяется на:

электрооборудование повышенной надежности против взрыва (в котором взрывозащита обеспечивается только в признанном нормальном режиме его работы; признанный нормальный режим работы приведен,

где это необходимо, в стандартах на виды взрывозащиты электрооборудования);

взрывобезопасное электрооборудование (в котором взрывозащита обеспечивается как при нормальном режиме работы, так и при признанных вероятных повреждениях, определяемых условиями эксплуатации, кроме повреждений средств взрывозащиты);

особовзрывозащищенное электрооборудование (в котором по отношению к взрывобезопасному электрооборудованию приняты дополнительные средства взрывозащиты, предусмотренные стандартами на виды взрывозащиты).

Исходя из этой классификации уровня взрывозащиты и в соответствии с изложенными выше особенностями теплопередачи в нагревательных устройствах с тэнами, тэны, активная поверхность которых контактирует непосредственно с взрывоопасной средой, могут относиться только к уровню электрооборудования повышенной надежности против взрыва; отнесение его к уровням "взрывобезопасное электрооборудование" и "особовзрывозащищенное электрооборудование" недопустимо, так как на оболочке тэна может возникнуть температура, значительно превышающая предел взрываемости для конкретной взрывоопасной смеси независимо от надежности тэна и качества его изготовления, исключающего электрический и электротепловой пробой и местное повышение температуры оболочки.

При необходимости создания нагревательных устройств с уровнем взрывозащиты "взрывобезопасное электрооборудование" или уровнем "особовзрывозащищенное электрооборудование" и неизбежным применением в качестве источника тепла тэнов необходимо обеспечить такую конструкцию нагревательного устройства, при которой условие недопустимости повышения температуры на оболочке тэна по любой из указанных выше причин (вызванных как нарушением работы собственно тэна, так и нарушениями параметров нагреваемой среды) должно гарантированно выполняться за счет средств контроля, сигнализации и отключения от сети, предусмотренных технической документацией на нагревательное устройство.

Из практики разработки и эксплуатации взрывозащищенных нагревательных устройств с применением тэнов и с уровнями "взрывобезопасное электрооборудование" и "особовзрывозащищенное электрооборудование" (пример такого нагревательного устройства приведен ниже) можно сделать вывод, что аппаратура и устройства по контролю необходимых для этого параметров и автоматическому отключению нагревательного устройства от электрической сети настолько громоздки и дорогостоящи, что в ряде случаев экономически более выгодно изготавливать нагревательное устройство таким образом, чтобы активная поверхность тэна не имела непосредственного контакта с взрывоопасной средой; при таком варианте тепло от оболочки тэнов передается к нагреваемой среде через промежуточное тело, исключающее

возможность образования как местного превышения температуры оболочки, так и повышения ее температуры по всей поверхности. Примеры таких нагревательных устройств:

тэны, установленные в масляной среде (тепло от нагретого масла передается взрывоопасной среде с помощью теплообменника);

тэны, установленные внутри металлической кассеты, между стенками которой и оболочкой тэнов засыпается кварцевый песок, в соответствии с ГОСТ 22782.2-77. Взрывоопасная среда имеет непосредственный контакт с разветвленной наружной поверхностью кассеты.

Температурные классы для взрывозащищенного электрооборудования (кроме рудничного) предусматривают максимальную температуру поверхности тэнов в диапазоне 85—450 °С — в зависимости от температуры самовоспламенения конкретного состава взрывоопасной смеси. Установлены следующие обозначения и предельные значения температур для каждого класса:

Температурный класс	Максимальная температура поверхности, °С
T1	450
T2	300
T3	200
T4	135
T5	100
T6	85

2. Дополнительные требования к конструкции, изготовлению, испытаниям и эксплуатации тэнов, предназначенных для установки во взрывозащищенные нагревательные устройства.

Расчет максимальной температуры поверхности тэна должен проводиться для конкретной установки с учетом ее номинальных и предельных режимов работы; максимально допустимая температура должна соответствовать конкретному температурному классу по ГОСТ 12.2.020-76.

Диаметр оболочки тэнов должен быть не менее 16 мм, а зазор по пьери-клазу между наружным диаметром спирали или контактными стержнями и внутренним диаметром оболочки не должен быть менее 4,8 мм; не допускается уменьшение шага спирали тэна от номинального значения более чем на 25%.

Сопротивление изоляции тэнов в холодном состоянии должно быть: на выходе с предприятия-изготовителя не менее $5 \cdot 10^8$ Ом; в течение всего срока службы не менее $2 \cdot 10^7$ Ом.

Сопротивление изоляции тэна в горячем состоянии на выходе с предприятия-изготовителя должно быть не менее 10^7 Ом. Ток утечки в горячем состоянии при номинальном напряжении не должен превышать 0,1 мА.

Обязательной мерой взрывозащиты для тэнов является защита по токам утечки на оболочку, устанавливаемая в составе нагревательного

устройства на группу тэнов и обеспечивающая отключение нагревателя при увеличении тока утечки выше допустимых значений.

Упаковка тэнов для защиты от воздействия климатических факторов должна соответствовать категории КУ-2 (раздел 3 ГОСТ 23216-78); допускается упаковку торцов производить плотно надетыми полихлорвиниловыми трубками, заполненными прокаленным силикагелем.

Технология изготовления тэнов должна предусматривать повышенные требования к качеству выполнения всех операций, в том числе:

обязательный входной контроль периклаза (не ниже первого класса по ГОСТ 13236-83) и заготовок труб (обязательно цельнотянутых с высоким качеством отжига);

соосность спирали и зазор по периклазу должны проверяться рентгенографированием на каждом тэне;

труба и нагревательный узел после тщательной очистки должны подвергаться обязательной прокатке;

контроль герметичности оболочки и торцов тэнов должны проводиться в климатической камере с относительной влажностью 98% при температуре 35 °С в течение 15 сут.

3. Конкретные требования по контролю параметров нагреваемой взрывоопасной среды и тэнов определяются назначением нагревательного устройства, категорией взрывоопасной смеси, уровнем и видом взрывозащиты устройства и температурным классом активной поверхности тэна.

В качестве примера приведены требования на разработанные ВНИИЭТО взрывозащищенные электрокалориферы (табл. 17), предназначенные для подогрева воздуха в процессе рециркуляции в камерах для сушки лакокрасочных покрытий и для применения во взрывоопасных зонах класса В-1а, согласно гл. 7.3 ПЭУ, в которых возможно возникновение взрывоопасных смесей паров и газов с воздухом категории ПА группы

Т а б л и ц а 17. Технические данные электрокалориферов взрывозащищенного исполнения

Параметр	Тип электрокалорифера		
	СФО-40/1,5-И2Ех	СФО-60/2,5-И2Ех	СФО-100/2,5-И2Ех
Номинальная мощность, кВт	+ 1,8 36,0 - 3,6	+ 3,0 60,0 - 6,0	+ 4,8 96,0 - 9,6
Подача воздуха, м ³ ·ч ⁻¹ :			
не более	10 000	10 000	20 000
не менее	8 000	8 000	15 000
Температура выходящего воздуха, °С, не более	250	250 (150)	250
Максимально допустимая температура на поверхности нагревателей, °С, не более	300	300 (200)	300

Параметр	Тип электрокалорифера		
	СФО-40/1,5-И2Ех	СФО-60/2,5-И2Ех	СФО-100/2,5-И2Ех
Аэродинамическое сопротивление по воздуху, Па, не более	500	500	500
Число электрических секций	3	4	7
Мощность секции, кВт	12	15	12 в I—III 15 в IV—VII
Напряжение сети, В	380	380	380
Напряжение не нагревателя, В	220	220	220
Частота, Гц	50	50	50
Число фаз	3	3	3
Схема соединений нагревателей	А	А	А

Примечание. Значение параметров, указанных в скобках, соответствуют применению электрокалорифера СФО-60/2,5-И2Ех для взрывоопасных смесей категории ПА, группы ТЗ согласно ГОСТ 12.1.011-78.

Т2 (Т3) согласно ГОСТ 12.1.011-78. Окружающая среда не должна содержать агрессивных газов, паров и пыли, разрушающих металл и изоляционные детали электрокалорифера.

Электрокалориферы представляют собой сварную конструкцию, выполненную из листового металла. Нагревательными элементами являются тэны U-образной формы с алюминиевым оребрением. Контактные стержни тэнов размещены во взрывонепроницаемой коробке выводов, которая выполнена согласно требованиям ГОСТ 22782.0-81 и ГОСТ 22782.6-81. Взрывонепроницаемость коробки выводов обеспечивается шириной щели (не более 0,4 мм) плоских и цилиндрических соединений, взрывонепроницаемость ввода кабеля достигается уплотнением его эластичной резиновой втулкой. Способ прокладки кабеля должен обеспечивать его разгрузку от растягивающих усилий. Все крепежные детали, а также токоведущие и заземляющие зажимы защищены от самоотвинчивания пружинными шайбами или контргайками. Крутящий момент, Н·м, затяжки крепежных деталей должен быть: на токоведущих частях для номинального диаметра резьбы:

M5 От 4 до 5
M6 От 6 до 8
M8 От 10 до 12

на взрывонепроницаемых сопряжениях для номинального диаметра резьбы:

M8 От 14 до 17
M10 От 18 до 25
M12 От 28 до 43
M16 От 52 до 75

Головки наружных крепежных болтов имеют охранные кольца. Доступ к головкам болтов возможен только посредством торцевого ключа.

Электрокалориферы имеют единую систему электропитания, регулирования и защиты с электрооборудованием камер сушки лакокрасочных покрытий, которая должна предусматривать следующие устройства контроля и блокировок:

подачу электропитания на тэны только при наличии воздушного потока через электрокалорифер не менее минимально допустимой подачи (табл. 17);

двухступенчатый непрерывный контроль температуры поверхности тэна; при температуре 290°C (190°C) подается сигнал в систему контроля, при 300°C (200°C) происходит отключение электрокалорифера;

автоматический контроль токов утечки, исключающий возникновение коротких замыканий между спиралью и оболочкой тэна; при суммарном токе утечки тэнов секции 10 мА происходит отключение секции электрокалорифера за время не более 50 мс;

блокировку, обеспечивающую обдув тэна после отключения электрокалорифера в течение 20 мин;

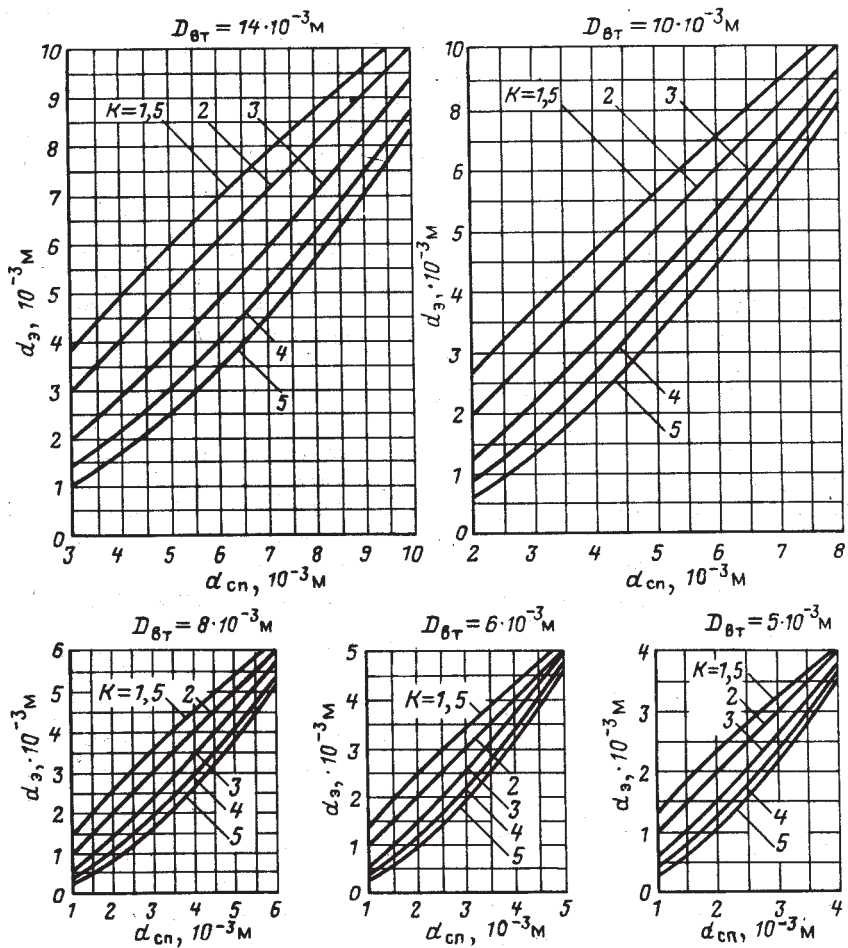
отключение электрокалорифера при возникновении концентрации рабочей среды, превышающей допустимую.

В конструкции электрокалорифера предусмотрены внутренний и наружный заземляющие зажимы. Оболочка каждого тэна имеет непосредственную связь с корпусом коробки выводов, электрическое сопротивление между заземляющим зажимом коробки и оболочкой тэна не должно превышать 0,1 Ом.

Поддержание температурного режима электрокалорифера осуществляется методом непрерывного регулирования мощности, которое производится по максимальному значению показаний двух малоинерционных термоэлектрических хромель-копелевых термометров с диаметром термоэлектродов 0,5 мм без защитного чехла. Эти термометры устанавливаются в потоке воздуха в последнем (по направлению воздушного потока) ряду тэнов — в центральной части сечения электрокалорифера. Для осуществления аварийного отключения в каждой регулируемой секции электрокалорифера устанавливаются по три термоэлектрических термометра (аналогичных термометрам для регулирования мощности); термометры устанавливаются на оребрении тэна на внутренней стороне его изогнутой части.

Тэны с термометрами аварийного отключения должны быть подключены к трем разным фазам. Отключение тэнов производится по двухкаскадной схеме. В момент достижения температуры 290°C (190°C) включаются световой и звуковой прерывистые сигналы; электрокалорифер продолжает работать, его отключение не происходит. При достижении температуры на поверхности тэна 300°C (200°C) тэны автоматически отключаются, включаются световой и звуковой непрерывные сигналы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Р и с. П.1. Диаграммы $d_3 = f(\alpha_{cn}; K)$ для трубчатых электронагревателей с различными размерами внутреннего диаметра оболочки

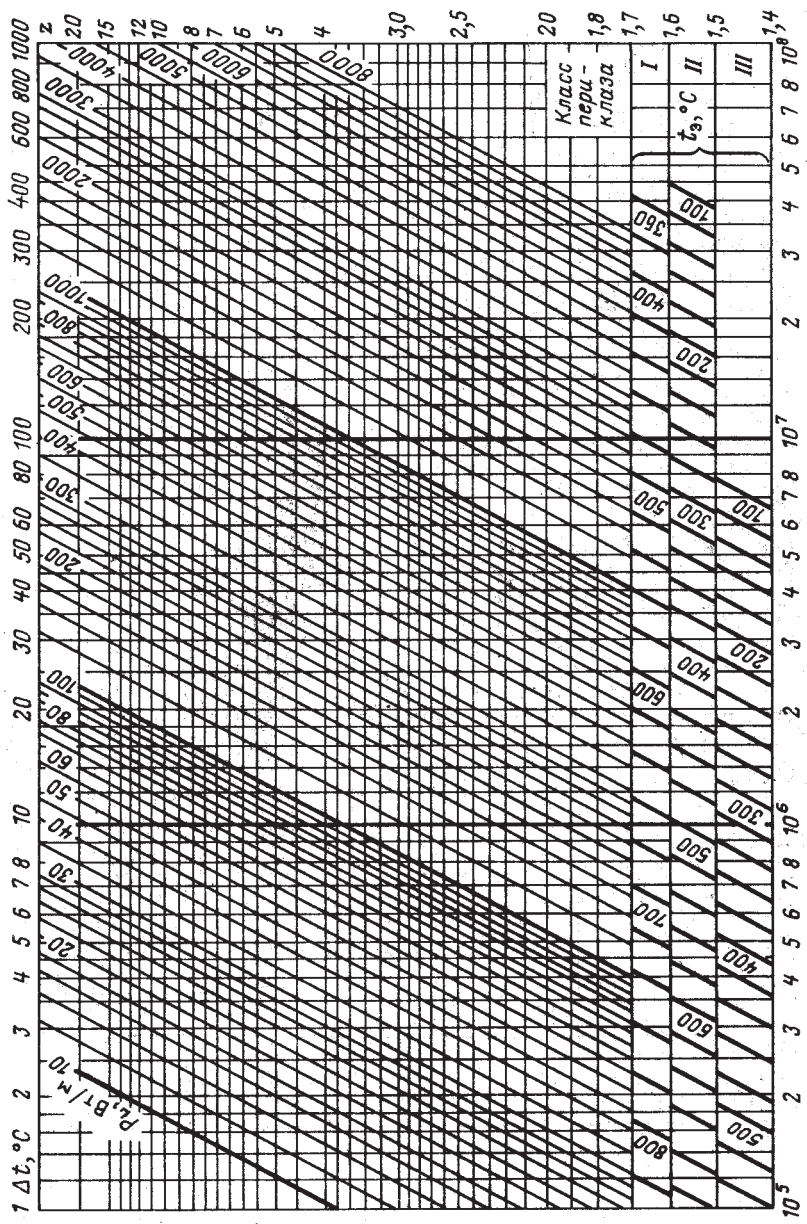
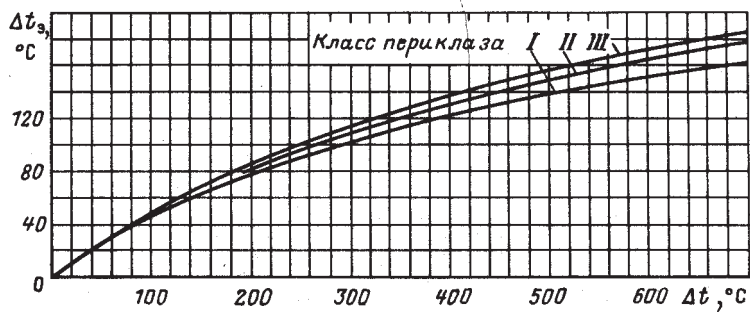
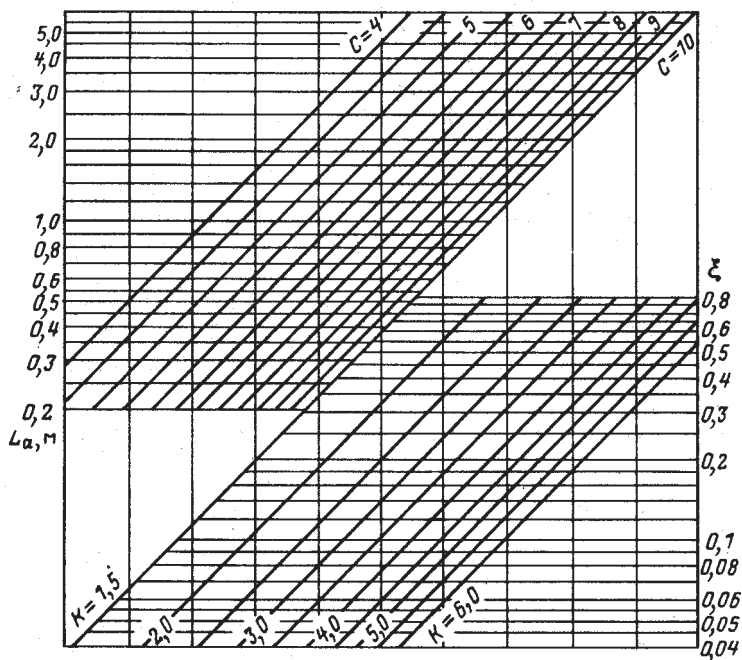


Рис.П.2. Номограмма $Z_1 = f(R_{из,л}; t_3)$ и $Z_2 = \varphi(\Delta t; P_L)$

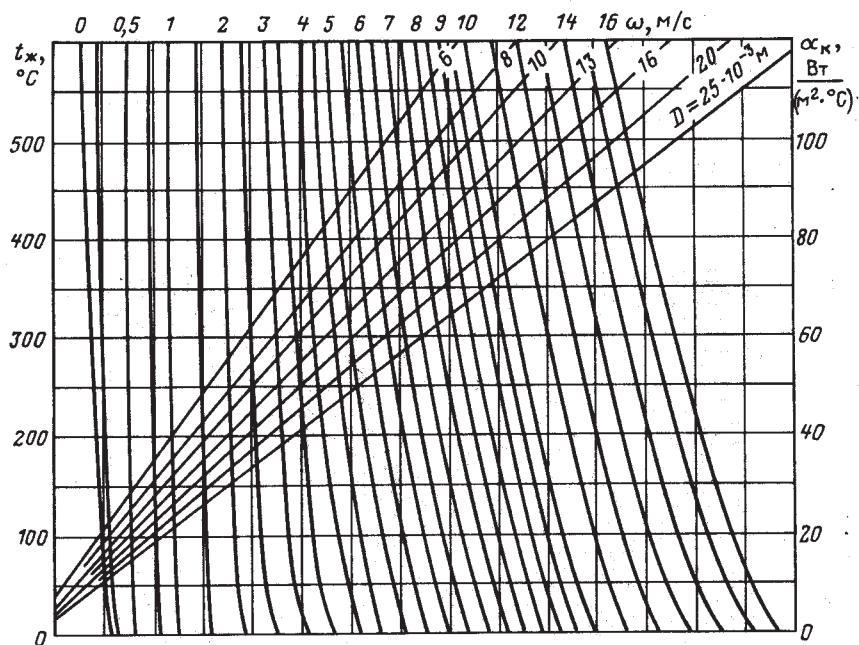


Р и с. П.4. Диаграмма $\Delta t_3 = f(\Delta t)$

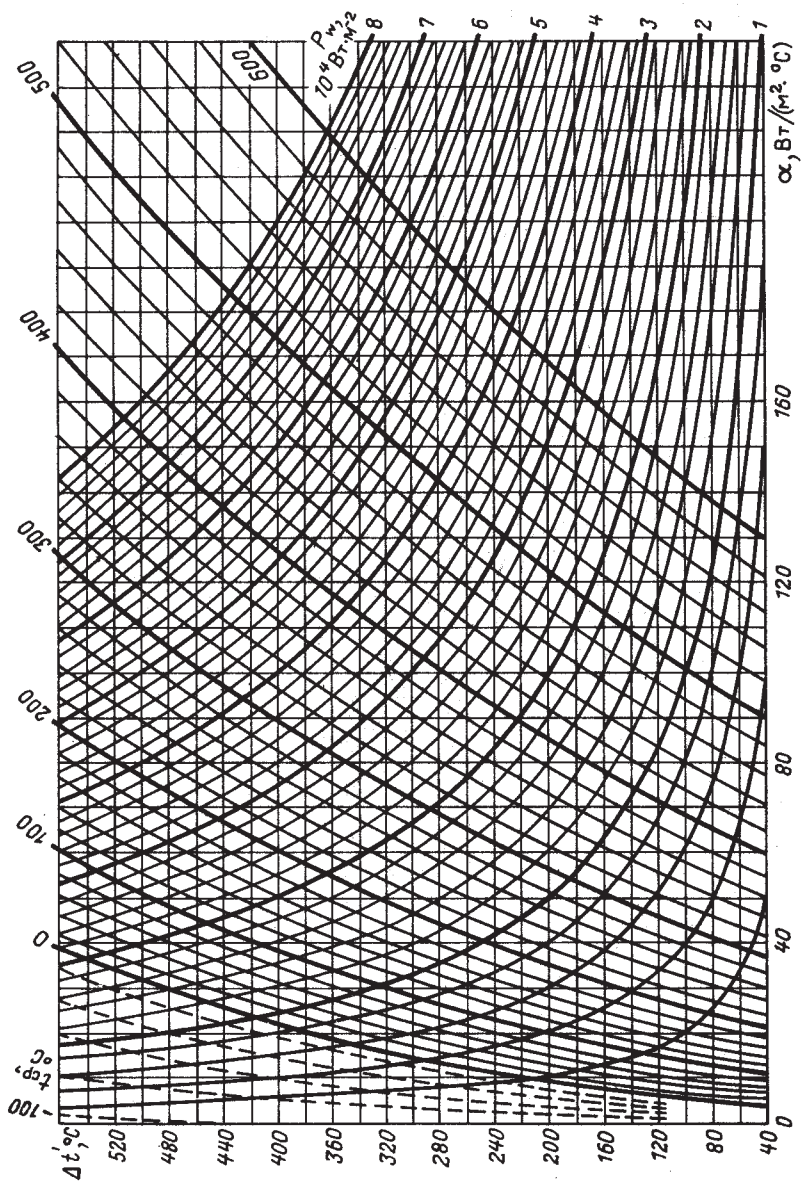


Р и с. П.5. Номограмма $\xi = f(L_a; c; K)$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

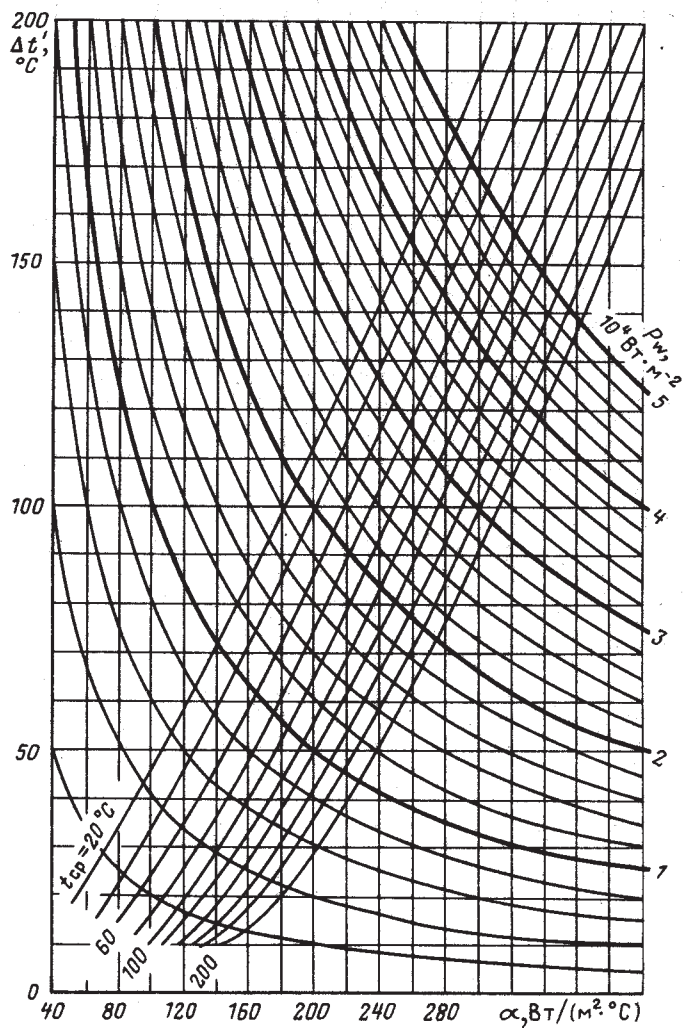


Р и с. П. 6. Номограмма $\alpha_k = f(t_{cp}; v; D)$

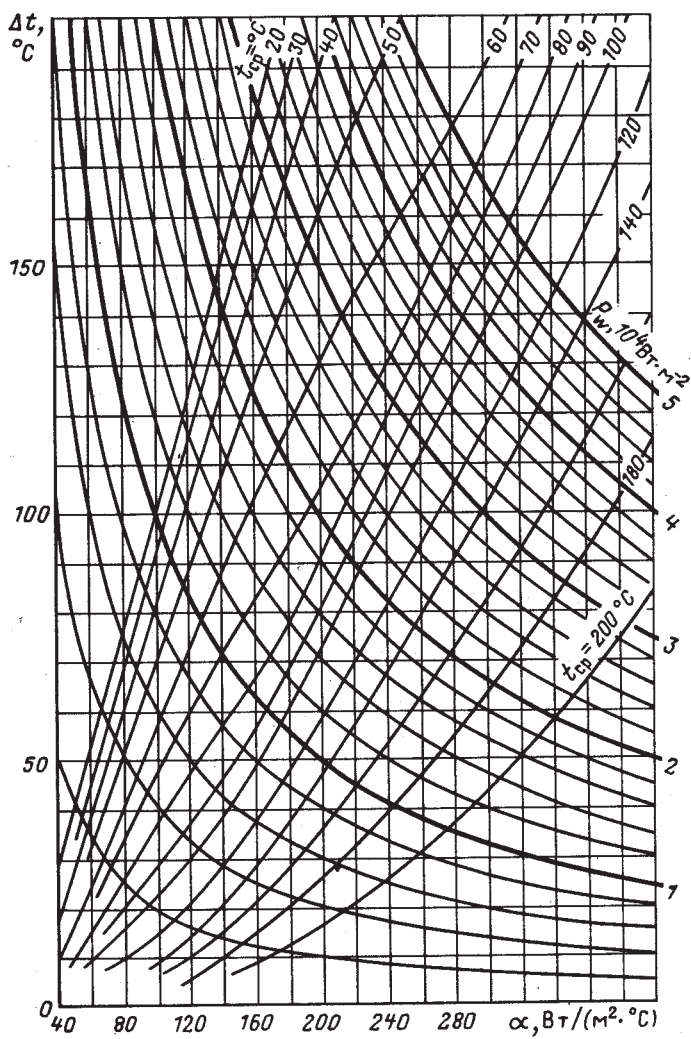


Р и с. П.7. Основная расчетная номограмма $\Delta t'_{cp}$, P_{W_2}

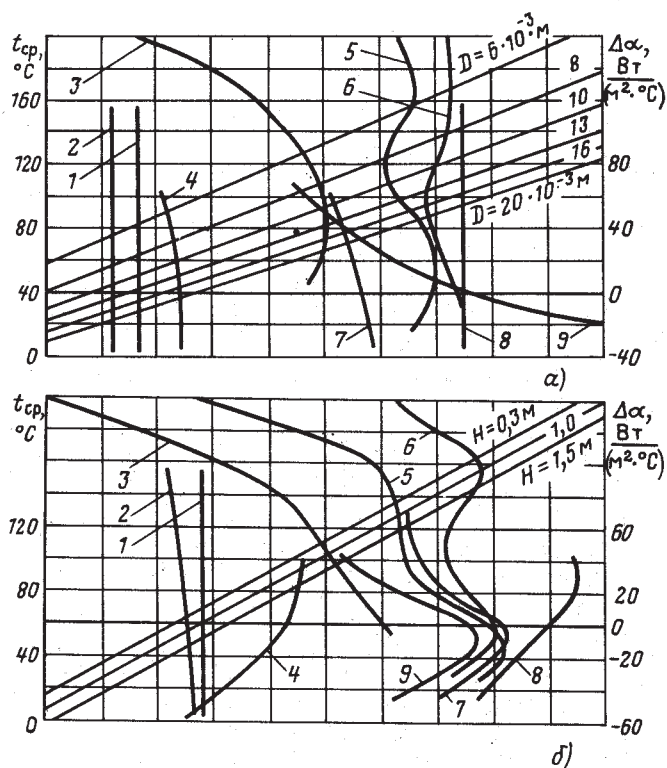
ПРИЛОЖЕНИЕ 3



Р и с. П8. Основная расчетная номограмма $\Delta t'$, P_w для горизонтально расположенных тэнов



Р и с. П.9. Основная расчетная номограмма $\Delta t', P_w$ для вертикально расположенных тэнов



Р и с. П.10. Номограмма $\Delta\alpha = f(t_{cp}; D; \text{тип масла})$ для горизонтально (а) и вертикально (б) расположенных тэнов:

1 – масло МК; 2 – масло МС-20; 3 – технический саломас "Титр-44"; 4 – масло ВМ-4; 5 – хлопковое масло рафинированное; 6 – подсолнечное масло; 7 – трансформаторное масло; 8 – масло ТМ-1; 9 – масло ХФ-22

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Краткое описание и принцип работы технологического оборудования для изготовления тэнов

Очистка труб от масла и окалины с помощью ультразвуковой щелочно-кислотной установки УЗУ-6-40 производится следующим образом: пакет труб длиной до 6 м в количестве 12 шт. загружается в первую ванну и каждая труба подключается шлангами к коллектору. Далее передача труб в каждую последующую ванну происходит автоматически.

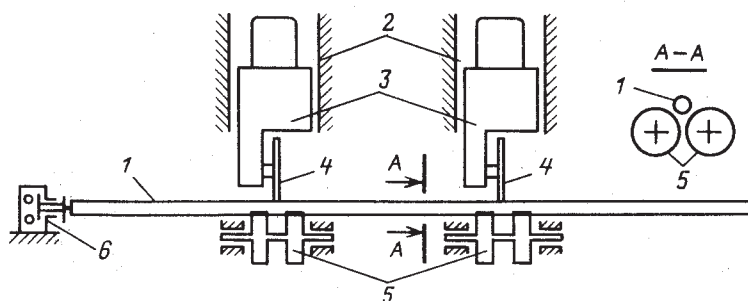
Производительность установки — один пакет за 6–9 мин, или 500–720 метров труб в час. Последовательность технологических операций, выполняемых для очистки труб:

- обезжиривание в водном растворе щелочи при температуре 60–70 °С;
- промывка в горячей проточной воде при температуре 50–60 °С;
- травление в водном растворе кислоты при температуре 60–70 °С;
- промывка в холодной проточной воде;
- ультразвуковая очистка в проточной воде при температуре 40–50 °С;
- пассивация в растворе NaNO_3 при температуре 80–90 °С;
- сушка в подвижной воздушной среде (скорость воздуха $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) при температуре 150 °С.

Для неокисленных углеродистых или нержавеющей труб проводить кислотную очистку нет необходимости.

Установка обеспечивает хорошее качество обезжиривания и очистки труб и обслуживается одним человеком. Занимаемая площадь 185 м². Для работы установки необходимо наличие сжатого воздуха, воды, пара (расход пара 0,5 т · ч⁻¹), должны быть очистные сооружения для очистки сбросов кислотных и щелочных растворов.

Резка труб на заготовки мерной длины. Наиболее производительный станок изготовлен и эксплуатируется на Московском заводе "Торгмаш" (рис. П.11). Два (или три) приводных устройства с режущим инструментом устанавливаются при наладке на заданном расстоянии по горизонтали друг от друга в зависимости от требуемой длины заготовки для тэнов. Вертикальное перемещение этих устройств происходит автоматически (вниз и вверх) на расстояние, необходимое для резки труб диаметром от 10 до 25 мм. После настройки станка оператор включает двигатели приводных устройств 3, устанавливает трубу 1 на ролики 5 и подает ее до упора конечного выключателя 6; при этом автоматически включается на перемещение вниз подача приводных устройств 3 с режущим инструментом 4. Труба разрезается на три (или четыре) отрезка, приводные устройства поднимаются вверх и автоматически останавливаются; отрезанные заготовки скатываются в лоток. Во время резки трубе сообщается вращательное движение от дискового ножа пилы. Затем цикл повторяется. Производительность составляет в среднем 1000 заготовок в час.



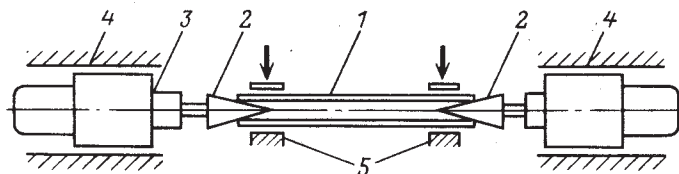
Р и с. П.11. Схема станка для резки труб на заготовки мерной длины:

1 — труба, разрезаемая на заготовки; 2 — направляющие для вертикального перемещения режущего инструмента с приводным устройством; 3 — приводное устройство с электродвигателем; 4 — режущий инструмент (абразивный круг, пила); 5 — опорные ролики (неприводные); 6 — конечный выключатель

Снятие внутренних фасок и заусенцев. Кроме устройства для снятия заусенцев, показанного на рис. 20, наибольшее применение получил станок, изображенный на рис. П.12, которым снимаются внутренние фаски и заусенцы. Этот принцип используется как с обработкой одного торца трубы (на большинстве заводов), так и с обработкой обоих торцов одновременно (Московский завод "Торгмаш").

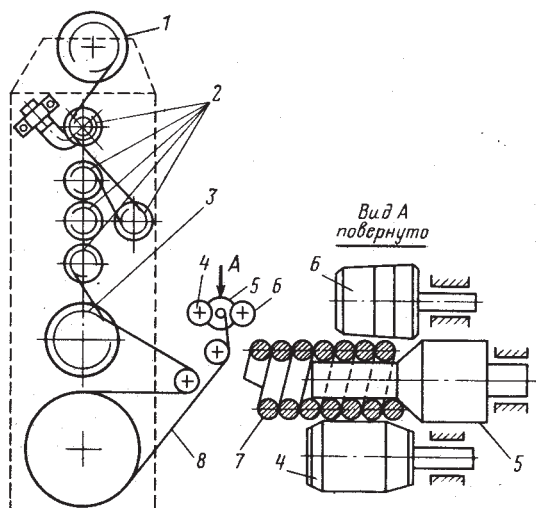
Приводные устройства 3 с зенкерами 2 устанавливаются на фиксированном расстоянии друг от друга, определяемом длиной заготовки трубы 1. При подаче трубы в рабочее положение пневматические зажимы 5 фиксируют ее, а приводные устройства с вращающимися зенкерами совершают поступательное продольное движение к трубе и обратно на постоянный ход, после чего зажимы 5 раздвигаются и цикл повторяется после подачи очередной трубы. Производительность станка с двухсторонней обработкой составляет в среднем 500 заготовок труб в час.

Изготовление спирали производится на спираленавивочных станках (рис. П.13). Проволока 8 с катушки 1 проходит через натяжные ро-

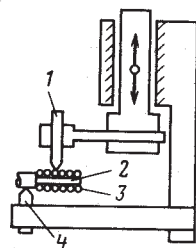


Р и с. П.12. Схема станка для снятия внутренних фасок и заусенцев:

1 — труба-заготовка; 2 — зенкер; 3 — приводное устройство с электродвигателем; 4 — направляющие приводного устройства; 5 — пневматические зажимы трубы



Р и с. П.13. Схема навивки спирали



Р и с. П.14. Схема машины для сварки спирали с контактным стержнем:

- 1 — верхний электрод;
- 2 — контактный стержень;
- 3 — спираль;
- 4 — нижний электрод

лики 2, создающие постоянное натяжение, через тянущий ролик 3 и далее, проходя через последующие натяжные ролики, попадает на спираленавивочный узел. Узел состоит из двух спиралеобразующих роликов 4 и 6, оправки 5; ролики 4 и 6 прижимают проволоку к оправке 5 и за счет конуса на оправке стягивают спираль 7 с оправки по мере навивки каждого последующего витка. На заданном расстоянии от оправки (в зависимости от требуемой длины спирали) проволока автоматически отрезается, а станок, продолжая работать, наматывает следующую спираль. Станок предназначен для намотки спиралей из проволоки диаметром от 0,15 до 1,0 мм, а при наличии специальной приставки — до 1,5 мм. Диапазон длины проволоки в одной спирали 0,7–16 м. Частота вращения шпинделя (оправки) 500–5000 об · мин⁻¹ (регулирование скорости бесступенчатое).

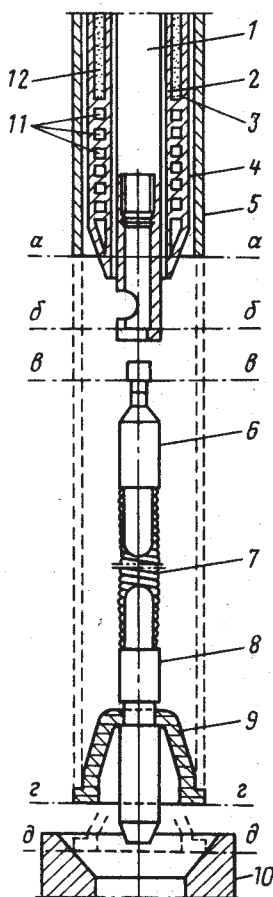
Соединение спирали с контактными стержнями производится на конденсаторной контактной машине типа ТКМ (рис. П.14). Свариваемый узел устанавливается на нижний электрод 4; в этот момент верхний электрод 1 поднят. При включении машины верхний электрод опускается вниз до соприкосновения со сварным узлом (спиралью 3 и контактным стержнем 2), прижимает (за счет пневматического привода) узел с определенным усилием; затем автоматически подается фиксированный импульс тока от конденсаторной батареи на оба электрода. После сварки подвижный электрод поднимается вверх. Регулировка усилия сжатия электродов и значение сварного тока выбираются в

зависимости от диаметров контактного стержня и проволоки спирали. Тщательная настройка этих параметров чрезвычайно важна для качественной сварки, от которой зависит надежность тэнов. Производительность машины 600 сварок в час.

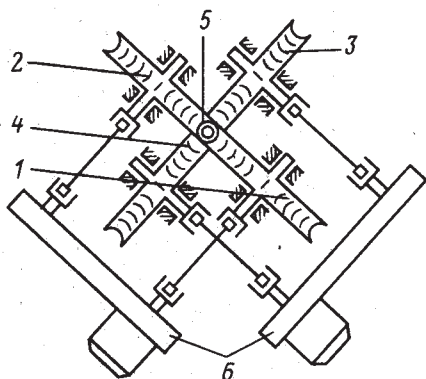
Наполнение трубы с нагревательным узлом периклазом производится на набивочной машине (рис. П.15). В начале цикла вручную устанавливается труба-заготовка тэна 5 в нижнее положение, нажатием кнопки труба прижимается пневматическим механизмом к нижней траверсе наполнительной машины (на рисунке не показано), нажатием второй кнопки поднимается цепным приводом вместе с нижней траверсой в положение, показанное на рис. П.15. Нагревательный узел в сборе (верхний контактный стержень 6, спираль 7, нижний контактный стержень 8 с технологической пробкой 9) вручную подвешивается к стержню наполнительной машины 1; при этом головка верхнего контактного стержня 6 с положения на оси в-в (на рисунке это положение показано условно) оказывается в положении на оси б-б. При нажатии кнопки управления нижняя траверса с трубой 5 опускается вниз, труба-заготовка упирается нижним торцом в технологическую пробку 9, растягивает спираль на заданное расстояние между контактными стержнями 6 и 8 до достижения технологической пробкой 9 упора наполнительной машины 10, труба 5 упирается в буртик технологической пробки 9 и плотно прижимает ее к упору 10, после чего движение нижней траверсы с трубой 5 автоматически прекращается.

При нажатии следующей кнопки управления опускается верхняя траверса с закрепленными к ней направляющими наполнительной машины 2 и 3 и мундштуком 4 до достижения мундштуком места соединения нижней технологической пробки 9 с нижним стержнем 8. Периклаз 12, заполняющий все пространство между внутренней и наружной направляющими 2 и 3, не высыпается внутрь трубы 5 за счет того, что система каналов 11 и мундштука 4 удерживает периклаз до момента начала вибрации заготовки тэна; просыпание периклаза через каналы мундштука происходит только во время вибрации.

Нажатием еще одной кнопки управления включаются вибраторы, расположенные на средней траверсе (на рисунке не показана), которые через гребенку производят удары по трубке с двух сторон в плоскости, перпендикулярной оси тэна; при этом периклаз просыпается через отверстия мундштука, равномерно заполняя пространство между трубкой и нагревательным узлом тэна, и уплотняется. Одновременно с включением вибраторов включается подъем верхней траверсы, и мундштук с направляющими поднимается вверх примерно с той же скоростью, с которой периклаз заполняет трубку тэна. После полной засыпки и уплотнения трубки периклазом она снимается (вручную) с наполнительной машины, и верхняя часть тэна плотно закрывается верхней технологической пробкой, которая, так же как и нижняя проб-



Р и с. П.15. Схема заполнения заготовок тэнов периклазом



Р и с. П.16. Схема опрессовки трубы на прокатном стане:

1, 2 — первая пара роликов; 3, 4 — вторая пара роликов; 5 — труба-заготовка; 6 — приводное устройство с электродвигателем

ка, исключает возможность высыпания периклаза из трубки до момента опрессовки ее на прокатном стане.

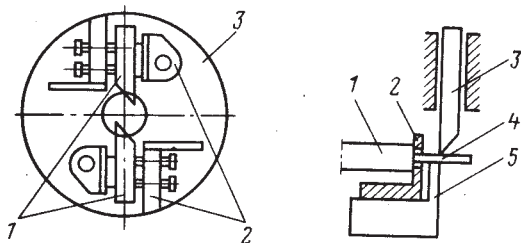
Наполнительные машины имеют различные исполнения по длине заполняемых тэнов (от 0,3 до 6,0 м и количеству одновременно устанавливаемых тэнов (от 6 до 24 шт.). Скорость заполнения периклазом составляет $150-250 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Более прогрессивной является конструкция наполнительной машины с одной направляющей трубкой, которая применяется для заполнения тэнов, как правило, до 10 мм и обеспечивает скорость заполнения периклазом $500-1000 \text{ мм/мин}$. Такие наполнительные машины освоены на Фастовском ЭЭТО.

Опрессовку тэнов можно осуществлять на различных машинах — многовалковых вальцах, ротационно-ковочной машине и прокатном стане.

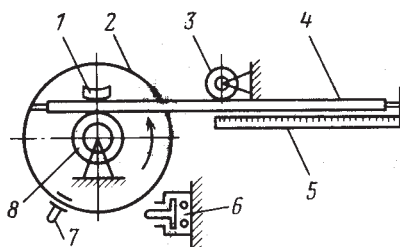
Прокатные станы, как наиболее производительные широко применяются на большинстве заводов. На рис. П.16 показана схема опрессовки трубы-заготовки на прокатном стане. Труба 5 подается в промежуток между вращающимися в противоположные стороны роликами 1 и 2, зазор между которыми на 0,5–1,0 мм меньше диаметра трубы. Ролики захватывают трубу, и дальнейшее ее продвижение происходит за счет трения между трубой и роликами, при этом происходит двухстороннее обжатие трубы до заданного размера; труба после первой пары роликов имеет частично эллипсную форму. Затем труба попадает во вторую пару роликов 3 и 4, оси которых расположены перпендикулярно к осям первой пары. Ролики второй пары имеют зазор на 0,5–0,8 мм меньше, чем первой, в результате чего происходит дополнительное обжатие трубы в плоскости, перпендикулярной к плоскости обжатия в первой паре. Далее по ходу труба попадает в третью пару роликов, расположенную так же, как первая, затем в четвертую пару, расположенную так же, как вторая, и т.д. В каждой паре роликов труба подвергается дополнительному обжатию по сравнению с предыдущей парой. Последняя пара роликов (на схеме показаны только первая и вторая пары) имеет очень незначительное дополнительное обжатие и является калибрующей. Всего в прокатных станах устанавливается от 6 до 14 пар роликов (в зависимости от типа тэнов). На выходе из стана труба движется по рольганговому столу и затем автоматически сбрасывается в накопитель. Для обслуживания двух-трех прокатных станов достаточно одного рабочего. Скорость прокатки составляет обычно $15 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Подрезка торцов тэнов производится на одно- и двухсторонних станках. На Московском заводе "Торгмаш" применяется станок, который одновременно подрезает торцы двух тэнов с обеих сторон. Принцип его работы аналогичен работе станка для снятия заусенцев и фасок, однако вместо зенкера устанавливается режущая головка 3 (рис. П.17). С каждой стороны станка установлено по две режущие головки; в рабочую зону подается одновременно два тэна. Режущая головка 3 снабжена одним или двумя резцами 1, закрепленными в приспособлении 2.



Р и с. П.17. Схема режущей головки станка для подрезки торцов тэнов

Р и с. П.18. Схема обрубки контактных стержней



Р и с. П.19. Схема гибки тэна на гибочном стане

Производительность станка с одним тэном, подрезаемым одновременно с двух сторон при скорости подачи головок 0,275 мм за один оборот, составляет 350–400 тэнов в час, производительность станка с одновременной подрезкой торцов двух тэнов примерно вдвое больше.

Обрубка контактных стержней производится на кривошипном прессе по схеме, указанной на рис. П.18. Тэны в количестве 3–5 шт. вставляются в щель до соприкосновения торцов оболочек тэнов 1 с упором 2, при этом контактные стержни тэнов 4 опираются на неподвижный нож 5. Подвижный нож 3 (с приводом от кривошипного механизма) опускается, отрубает одновременно все стержни и поднимается вверх. Пакет тэнов вынимается из щели упора 2, и цикл повторяется. Время, затрачиваемое на один цикл, составляет 7–10 с.

Гибка тэнов производится на гибочных станках с применением оснастки различных конструкций — в зависимости от формыгиба, количества плоскостей, в которых производится гиб, и серийности выпуска нагревателей данной формы. На рис. П.19 показана схема гибки тэна на одном из таких станков. Рабочий стол 2 опирается на вертикальную приводную ось, расположенную так же, как и привод, ниже стола в станине станка. Заготовка тэна 4 устанавливается одним концом между копиром 8 стола и прижимом 1, а другим концом соприкасается с упором мерной линейки 5, обеспечивающим заданное расстояние от началагиба до конца тэна. При включении электропривода станка стол 2 приводится во вращение, захватывает прижимом 1 тэн и сгибает оболочку нагревателя по форме копира 8 до того момента, пока стол, повернувшись на заданный угол, автоматически остановится за счет нажатия упора 7 на конечный выключатель 6. В процессегиба оболочка тэна катится по упорному ролику 3. Время, затрачиваемое на гиб одного конца тэна на угол, например, 90° составляет 3–5 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фонарев З.И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. Л.: Недра, 1984.
2. Сучков В.Ф., Светлова В.И., Финкель Э.Э. Жаростойкие кабели с минеральной изоляцией. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Черепанов А.М., Тресвятский С.Т. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. М.: Metallurgy, 1964.
4. Гутман М.Б., Белагин Ю.А. Теплопроводность периклаза в тэнах. Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1972. Вып. 2 (116). С. 20.
5. Гутман М.Б., Белагин Ю.А. Влияние примесей на электросопротивление периклаза // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1972. Вып. 6 (120). С. 7.
6. Патрина Н.А., Шур Н.Ф. Защитные покрытия для деталей электропечей. М.: Энергия, 1975.
7. О влагопоглощении электротехнического периклаза — наполнителя тэнов / Г.С. Беляев, Ю.А. Белагин, А.А. Скрипник и др. // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1981. Вып. 3 (220). С. 19.
8. Физико-химические процессы, происходящие в тэнах во время эксплуатации / Г.С. Андреева, Г.С. Беляев, Ю.А. Белагин и др. // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1983. Вып. 6 (244). С. 9.
9. Коррозионная стойкость оболочек тэнов в расплавах селитры и щелочи / М. Б. Гутман, А.И. Иоффе, К.С. Борисанова и др. // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. 1981. Вып. 3 (220). С. 23.
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.
11. Низкотемпературный электронагрев / А.П. Альтгаузен, М.Б. Гутман, С.А. Мальшев и др. Под общ. ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергия, 1978.
12. Взрывозащищенное и рудничное оборудование. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1985.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Глава первая. Трубчатые электрические нагреватели и нагревательные кабели	4
1. Общие сведения	4
2. Конструкции нагревателей и предъявляемые к ним технические требования	10
3. Краткая характеристика основных материалов, применяемых для изготовления тэнов и нагревательных кабелей	24
4. Достоинства и недостатки тэнов, области их применения	38
Глава вторая. Краткое описание технологического процесса производства тэнов и нагревательных кабелей	40
5. Основные технологические операции и особенности их выполнения при производстве круглых двуконцевых тэнов	40
6. Краткие сведения о технологических операциях при производстве патронных и плоских тэнов	61
7. Основные операции технологического процесса производства нагревательных кабелей	63
Глава третья. Метод расчета тэнов. Вопросы надежности	65
8. Задачи расчета	65
9. Математическая модель трубчатого нагревателя	66
10. Метод расчета основных параметров тэна	71
11. Метод расчета температуры спирали и сопротивления изоляции тэна	82
12. Корректировка расчетов в целях учета погрешностей шага витков спирали	85
13. Схема расчета тэна по упрощенному методу	88
14. Расчет основных параметров заготовок	91
15. Вопросы надежности тэнов	95
Глава четвертая. Выбор тэнов для комплектации нагревательных устройств	105
16. Общие правила выбора тэнов	105
17. Выбор основных конструктивных параметров тэнов	107
18. Определение максимально допустимой удельной поверхности мощности тэнов и расчет температуры нагрева их оболочки	108
19. Описание конструкций электронагревательных устройств тэнами	114
Глава пятая. Эксплуатация тэнов	121
20. Рекомендации по монтажу тэнов	121
21. Рекомендации по эксплуатации тэнов	130
22. Правила техники безопасности	133
23. Особенности применения нагревательных устройств с тэнами, предназначенными для нагрева взрывоопасных сред	136
Приложения	143
Список литературы	159