

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. Е. Заяц, В. С. Корко, Р. И. Кустова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

*Рекомендовано УМО по образованию в области энергетики
и энергетического оборудования в качестве пособия
для студентов высших учебных заведений по специальности
«Автоматизация технологических процессов и производств
(сельское хозяйство)»*

МИНСК
БГАТУ
2011

УДК 621.3.036.66(075.8)
ББК 31.292я7
340

Заяц, А. Е.
340 Электрические элементные нагреватели : пособие / А. Е. Заяц
[и др.] ; под ред. проф. Е. М. Зайца. – Минск : БГАТУ, 2011. – 180 с.
ISBN 978-985-519-429-4.

Издание содержит описание физических основ преобразования электрической энергии в тепловую, материалов нагревательных элементов, типов и устройств, в нем приведены методики расчета элементных трубчатых, протяженных и поверхностно распределенных нагревателей.

Пособие предназначено для студентов агроинженерных специальностей, учащихся агротехнических колледжей и рекомендовано инженерам сельскохозяйственного производства для использования в практической работе.

УДК 621.3.036.66(075.8)
ББК 31.292я7

ISBN 978-985-519-429-4

© БГАТУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Производство, переработка и хранение сельскохозяйственной продукции тесно связано с потреблением тепловой энергии. Надежное теплоснабжение сельскохозяйственных потребителей во многом определяется качеством электротермического оборудования, обеспечивающего температурные режимы в технологических процессах.

Электротермическое оборудование отличается большим разнообразием физических принципов, конструктивных решений и функциональным назначением. Электрические элементные нагреватели занимают наиболее значительную часть электротермического оборудования, используемого при выращивании животных и растений, переработке сельскохозяйственного сырья. Правильный выбор вида электротермического оборудования, его расчет и проектирование являются действенным средством повышения эффективности технологических процессов.

В пособии приведены основные сведения по устройству, расчету и выбору элементных нагревателей применительно к процессам сельскохозяйственного производства.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВА

1.1. Основы механизма преобразования электрической энергии в тепловую

В 1843 году академик Э. Х. Ленц в статье «О законах выделения тепла гальваническим током» делает вывод: «Нагревание проволоки гальваническим током пропорционально сопротивлению проволоки и квадрату служащего для нагревания тока». Хотя первые опыты по измерению теплового действия электрического тока были проделаны английским ученым Джоулем в 1841 г., лишь после убедительных экспериментов Ленца полученные результаты стали законом. Поэтому совершенно справедливо установленный закон носит имя двух его первых исследователей Джоуля–Ленца. Позже эффект нагревания проводника электрическим током получил объяснение на основе теории электронной проводимости металлов.

Свободный заряд e в проводнике, к которому приложено электрическое поле напряженностью E , испытывает действие силы

$$\vec{F}_i = e\vec{E} \quad (1.1)$$

и приобретает ускорение

$$\vec{a}_i = \frac{\vec{F}_i}{m}, \quad (1.2)$$

где m – масса заряда.

За время свободного пробега τ_i заряд с начальной скоростью v_{in} приобретает дополнительную скорость:

$$g_{in} = g_{in} - \vec{a}_i \tau_i = \vec{g}_{in} - \frac{e\vec{E}}{m} \tau_i. \quad (1.3)$$

Кинетическая энергия заряда возрастает:

$$\frac{1}{2} m (\vec{g}_{in}^2 - \vec{g}_m^2) = -e\vec{E} \vec{g}_m^2 \tau_i + \frac{e^2 E^2 \tau_i^2}{2m}. \quad (1.4)$$

Учитывая, что скорости движения зарядов по направлениям в отсутствии электрического поля распределены случайно, можно принять

$$-e\bar{E} \sum \bar{g}_m \tau_i = 0. \quad (1.5)$$

Тогда увеличение кинетической энергии n частиц в единице объема проводника

$$W = \int_0^\infty \frac{e^2 E^2 \tau_i^2}{2m} \frac{n}{\tau} e^{-\frac{\tau_i}{\tau}} d\tau = \frac{ne^2}{m} E^2 \tau^2, \quad (1.6)$$

где τ — средняя продолжительность свободного пробега заряда.

Приняв во внимание, что удельная электрическая проводимость материала проводника

$$\gamma = \frac{ne^2}{m} \tau, \quad (1.7)$$

получим электрическую мощность, преобразующуюся в теплоту в единице объема этого проводника:

$$P = \gamma E^2. \quad (1.8)$$

В элементе проводника объемом dV

$$dp = \gamma E^2 dV \quad \text{или} \quad dp = \rho j^2 dV, \quad (1.9)$$

где ρ — удельное сопротивление материала проводника,
 j — плотность тока в проводнике.

Чтобы определить мощность, выделяющуюся в проводнике, необходимо проинтегрировать

$$P = \iiint \rho j^2 dV \quad \text{или} \quad P = \iiint \bar{j} \bar{E} dV. \quad (1.10)$$

Рассмотрим тонкую трубку тока сечением S и длиной l от точки А до точки В. Мощность, рассеянная в этой трубке,

$$\int_A^B \bar{j} \bar{E} d\bar{l}. \quad (1.11)$$

Так как плотность тока по сечению трубки одинакова

$$\bar{j} d\bar{S} = \bar{j}_1 d\bar{S}_1,$$

интеграл (1.11) становится:

$$\bar{j}_1 d\bar{S}_1 \int_A^B \bar{E} d\bar{l} = \bar{j}_1 d\bar{S}_1 (U_A - U_B).$$

Применительно к сумме трубок тока

$$P = \iint_{S_1} (U_A - U_B) \bar{j}_1 d\bar{S}_1 = (U_A - U_B) I$$

и окончательно, так как $U_A - U_B = IR$:

$$P = I^2 R \quad \text{или} \quad P = \frac{U^2}{R}. \quad (1.12)$$

Закон Джоуля–Ленца в дифференциальной (1.8) и интегральной (1.12) форме показывает, что электрическая мощность, преобразованная в теплоту при протекании тока в проводнике, пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна сопротивлению проводника. Энергия электрического поля расходуется на увеличение скорости движения свободных зарядов, которые взаимодействуют с другими элементарными частицами, увеличивают скорость их колебательного движения и, следовательно, температуру проводника в целом.

1.2. Классификация элементных нагревателей

Элементный нагрев наряду с электродным и электроконтактным является одним из видов электрического нагрева токами проводимости. Энергия электрического тока преобразуется в тепловую в нагревательном элементе и от него конвекцией, теплопроводностью, излучением или их комбинацией передается к нагреваемой среде.

Нагревательный элемент выполняют из токопроводящего материала высокого сопротивления в виде спирали из проволоки, зигзагов ленты, стержня, пленки на изолирующей основе и т. п.

Нагреватель состоит из нагревательного элемента и устройств для подвода тока, электроизоляции, защиты от внешних воздействий, крепления.

Элементные нагреватели разделяют:

- по температуре (низкотемпературные – до 350 °С, среднетемпературные – 350–2000 °С, высокотемпературные – более 2000 °С);
- материалу нагревательного элемента (металлические, полупроводниковые, неметаллические);
- форме материала нагревательного элемента (проволочные, ленточные, стержневые, пленочные, тканевые и др.);
- степени защиты нагревательного элемента от внешней среды (открытые, закрытые, герметические);
- конструктивному исполнению нагревателя (трубчатые, протяженные, поверхностно распределенные).

Открытые нагреватели просты по устройству, имеют хорошие условия для теплоотдачи, ремонтнопригодны. Их недостатком являются повышенная электрическая опасность и небольшой срок службы. Они применяются главным образом в высокотемпературных установках с теплоотдачей преимущественно излучением (электрические печи, термоизлучатели).

Закрытые нагреватели: нагревательные элементы размещены в корпусе, предохраняющем от механического воздействия и нагреваемой среды.

Герметические нагреватели: нагревательные элементы защищены от воздействий механических, нагреваемой и окружающей среды, например, воздуха.

Трубчатые электрические нагреватели могут быть закрытыми и герметическими, цилиндрической, прямоугольной и другой формы.

В установках низко- и среднетемпературного нагрева наиболее распространены герметические трубчатые электрические нагреватели (ТЭН), используемые для нагрева газов, жидкостей и твердых тел в различных технологических процессах.

Протяженные электрические нагреватели представляют собой нагревательные провода, кабели, ленты. Такие нагреватели применяют в низкотемпературных технологических процессах с низкой плотностью тепловых нагрузок (10^2 – 10^3 Вт/м²), рассредоточенных на значительной площади, например, для электрообогрева почвы в сооружениях защищенного грунта, полов, дорог, тротуаров, трубопроводов, технологических емкостей и т. п.

Поверхностно распределенные нагреватели выполняют из проволоки, токопроводящих частиц, волокон или пленок, создающих соответственно дисперсные, волокнистые или сложные композиции на поверхности или в объеме электроизоляционного компонента, который обычно является несущим основанием. В качестве токопроводящих используют металлы, углерод и другие материалы. Несущими могут быть ткани, керамика, металлические подложки, пластмассы. Поверхностно распределенные нагреватели бывают гибкие и жесткие: гибкие можно изогнуть по форме нагреваемой поверхности; жесткие нагреватели не приспособлены к изменению конфигурации, заданной при изготовлении. Поверхностно распределенные нагреватели отличаются от других своей тонкослойностью при достаточно развитой площади поверхности. Их применяют при тепловых нагрузках до 10^4 Вт/м². Примером служат гибкие электропроводящие ткани, пленочные резистивные покрытия, стеклопластиковые и полимерные тонкостенные панели.

1.3. Материалы для нагревательных элементов

Материалы нагревательных элементов должны отвечать следующим требованиям.

Высокая жаростойкость – устойчивость к окислению при высоких температурах. Окисление уменьшает площадь поперечного сечения, увеличивает сопротивление, ускоряет разрушение нагревательного элемента.

Высокая жаропрочность – способность материала выдерживать механические нагрузки при высоких температурах, как минимум, не провисать под собственной массой.

Высокое удельное электрическое сопротивление. С увеличением сопротивления уменьшаются габариты нагревателя и расход материалов на его изготовление.

Малый температурный коэффициент сопротивления. Зависимость сопротивления от температуры ведет к изменению мощности нагревателя, затрудняет расчет и регулирование температуры.

К другим требованиям относят: постоянство электрических свойств и размеров, технологичность при изготовлении нагревателей, приемлемую стоимость.

Основными характеристиками материалов для нагревателей являются удельное электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления (ТКС), максимальная рабочая температура и другие, указанные в табл. 1.1–1.5.

Удельное электрическое сопротивление материала зависит от его природы и температуры. Математическое выражение зависимости от температуры называют температурной характеристикой удельного сопротивления, которую для металлических проводников чаще всего записывают в виде:

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (1.13)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление проводника при 20 °С, Ом·м;

α – температурный коэффициент сопротивления, °С⁻¹,

t – температура, при которой рассчитывают сопротивление, °С.

Удельное сопротивление полупроводниковых и неметаллических нагревательных материалов имеет сложную зависимость от температуры. В этом случае чаще всего пользуются величиной сопротивления конкретного нагревателя, указанной в его технических характеристиках.

Температурный коэффициент сопротивления зависит от природы материала, показывает увеличение (положительный ТКС) или уменьшение (отрицательный ТКС) сопротивления проводника при увеличении температуры. Для рассматриваемых сплавов высокого сопротивления и сталей ТКС положительный, его величина изменяется нелинейно в диапазоне рабочих температур. Поэтому для

расчета сопротивления нагревателей используют поправочные коэффициенты ρ_t / ρ_{20} (табл. 1.2, 1.3) или графические зависимости (рис. 1.1). Ориентировочное увеличение удельного сопротивления при изменении температуры от 20 °С до максимальной рабочей составляет, %: нихромы – 2,5–10,0; фехрали – 4–14; хромели – 1,6–10,0; углеродистые стали – 250–310.

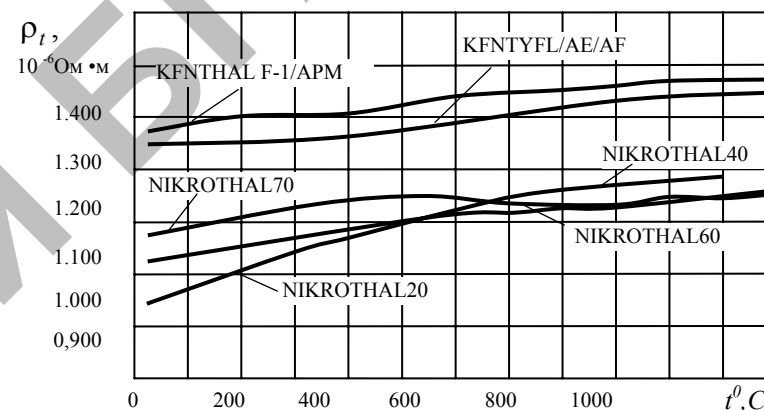


Рис. 1.1. Зависимость удельного электрического сопротивления сплавов от температуры

Максимальная рабочая температура материала нагревательного элемента принята исходя из скорости его разрушения, т. е. срока службы и достаточной окупаемости. Срок службы зависит от вида материала проводника, его массивности, окружающей среды и частоты включений нагревателя (табл. 1.1, 1.4).

Активное сопротивление нагревателя переменному току:

$$R_t = \kappa_n \frac{\rho_t l}{S}, \quad (1.14)$$

где κ_n – коэффициент поверхностного эффекта;

l, S – длина и площадь сечения проводника нагревательного элемента, м, м².

Поверхностный эффект состоит в уменьшении плотности тока от поверхности в глубь проводника вследствие затухания проникающего в него электромагнитного поля.

На промышленной частоте для немагнитных материалов принимают $\kappa_n = 1$, для малоуглеродистых сталей круглого сечения

$$\kappa_n = 1 + \frac{0,2d}{Z_a}, \quad (1.15)$$

прямоугольного сечения

$$\kappa_n = 1 + \frac{0,4\epsilon}{Z_a}, \quad (1.16)$$

где d, ϵ – диаметр и ширина проводника (рис. 1.5), м;

Z_a – глубина проникновения тока, м.

Формулы (1.15) и (1.16) справедливы до температуры, соответствующей точке Кюри.

Глубина проникновения тока в проводник, м:

$$Z_a = 503 \sqrt{\rho_t / \mu f}, \quad (1.17)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость материала;

f – частота электрического тока, Гц.

Относительная магнитная проницаемость может быть определена по амплитудному значению напряженности магнитного поля на наружной поверхности стального проводника, А/м (рис. 1.2):

$$H = \sqrt{2} I / \Pi, \quad (1.18)$$

где I – сила тока в проводнике, А;

Π – периметр поперечного сечения проводника, м.

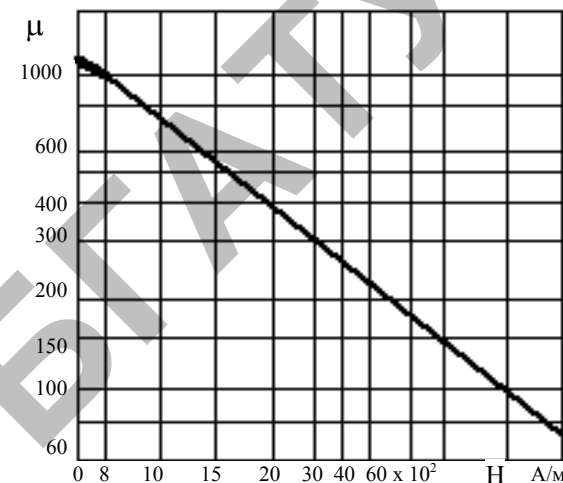


Рис. 1.2. Зависимость среднего значения относительной магнитной проницаемости мало- и среднеуглеродистых сталей от напряженности магнитного поля

Нагревательные элементы изготавливают из металлических (никельхромовые и железохромоалюминиевые сплавы, углеродистые стали), полупроводниковых (карбидкремниевые, дисилицидмолибденовые, хромитлантановые соединения, многокомпонентные сплавы для тонкопленочных нагревателей, содержащие Si, Fe, Cr, Al, Ti) и неметаллических (углеродные нити, ленты, ткани) материалов.

Никельхромовые сплавы (сокращенно – нихромы) – X15H60, X15H60-H, X20H80-H, NIKROTHAL и др. – состоят из никеля (20–80 %), хрома (15–30 %) и железа. Удельное сопротивление до $1,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Рабочая температура до 1250 °С.

Железохромоникелевые сплавы: *фехралы* (X15Ю5, X23Ю5, X27Ю5E, KANTHAL) содержат железа 65–75 %, хрома 21–28 % и алюминия 4–6 %; *хромали* (XH60Ю3, XH70Ю-H и др.) состоят из 26–29 % хрома, 60–70 % никеля и 3–4 % алюминия. Удельное сопротивление до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Рабочая температура до 1400 °С.

Нихромы, фехралы и хромели содержат в своем составе углерод, кремний, марганец, серу, фосфор, титан и другие примеси в количестве от сотых долей до 1,5 %.

Железохромоникелевые сплавы по сравнению с нихромами обладают более высокими рабочей температурой и удельным сопротивлением, большим в 2–4 раза сроком службы и меньшей (в 2–3 раза) стоимостью. Однако они более твердые и хрупкие, магнитны, сильнее корродируют во влажной среде при комнатной температуре, их жаростойкость ниже.

Характеристики наиболее распространенных сплавов высокого сопротивления даны в табл. 1.1–1.4.

Таблица 1.1

Сортамент и основные характеристики сплавов высокого электрического сопротивления [1]

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Сортамент		Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, ·10 ⁻⁶ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, ·10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Максимальная рабочая температура нагревательного элемента в воздухе, °С			
		Проволока	Лента холоднокатанная			Диаметр или толщина, мм			
						Диаметр, мм	Толщина, мм	Ширина, мм	
X15P60	8200	0,3–7,5	0,1–3,2 6–250	1,06–1,16	17,0	850	900	950	1000
X15H60-H	8200	0,1–7,5	0,1–3,2 6–250	1,07–1,17	17,0	900	950	1000	1075
X20H80-H	8400	0,1–7,5	0,1–3,2 6–250	1,04–1,15	18,0	950	1000	1100	1150
XH70Ю	7900	1,0–7,0	–	1,25–1,35	21,0	950	1000	1100	1175
X15Ю5	7280	0,2–7,5	0,2–3,2 6–80	1,24–1,34	16,0	750	850	900	950
X23Ю5	7250	0,3–7,5	0,2–3,2 6–80	1,30–1,40	15,0	950	1025	1100	1150
X23Ю5Т	7210	0,3–7,5	0,2–3,2 6–80	1,34–1,45	15,0	950	1075	1225	1350
X27Ю5Т	7190	0,5–5,5	0,2–3,2 6–80	1,37–1,47	15,0	950	1075	1200	1300
XH60Ю3	8100	3,0–7,0	–	1,24–1,34	17,0	950	1000	1050	1100
XH20ЮС	7700	0,3–7,5	0,1–3,2 6–80	0,98–1,06	19,0	900	950	1000	1050
X15H60Ю3А	7900	0,5–7,0	–	1,20–1,30	15,0	900	950	1000	1050

Таблица 1.2

Поправочные коэффициенты для расчета зависимости электрического сопротивления сплавов от температуры

Марка сплава	Отношение удельных сопротивлений ρ_t / ρ_{20} при температуре, °С									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
X15Ю5	1,004	1,013	1,025	1,041	1,062	1,090	1,114	1,126	1,135	1,140
X23Ю5, X23Ю5Т	1,002	1,007	1,013	1,022	1,036	1,056	1,063	1,067	1,072	1,076
X27Ю5Т	1,002	1,005	1,010	1,015	1,025	1,030	1,033	1,035	1,040	1,040
XH20ЮС	–	1,075	–	1,145	–	1,210	–	1,250	–	1,290
X15H60	1,013	1,029	1,046	1,062	1,074	1,083	–	–	–	–
X15H60-H	1,013	1,029	1,046	1,062	1,074	1,083	1,083	1,089	1,097	1,105
X20H80-H	1,006	1,015	1,022	1,029	1,032	1,023	1,016	1,015	1,017	1,025
XH60Ю3	1,059	1,073	1,085	1,095	1,102	1,101	1,100	1,092	1,094	1,100
XH70Ю	1,004	–	–	–	1,052	1,053	1,036	1,015	1,016	1,016
X15H60Ю3А	–	0,983	0,999	1,022	1,041	1,020	1,012	1,008	1,012	1,015

Конструкционные стали, применявшиеся в нагревателях уже в начале XX в., не получили широкого распространения из-за следующих недостатков [3].

1. Электротехнические характеристики конструкционных сталей не регламентируются, значения их имеют большой разброс. Удельное электрическое сопротивление конструкционных сталей различных марок при 20 °С колеблется в пределах от $0,103 \cdot 10^{-6}$ до $0,189 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, а относительная магнитная проницаемость в пределах 3500–500. Такой разброс не позволяет рассчитывать стальные нагреватели столь же уверенно, как нагреватели из специальных сплавов, электрические параметры которых изменяются лишь в пределах 1–2 %.

2. Электрические нагреватели практически всегда питаются переменным током, и рассчитывать их надо с учетом поверхностного эффекта. Так как удельное электрическое сопротивление конструкционных сталей сильно зависит от температуры (табл. 1.5), а магнитная проницаемость – от напряженности магнитного поля, т. е. от проходящего по проводнику тока, то и глубина проникновения поля в такой проводник, следовательно, и его активная площадь сечения не остаются постоянными, а изменяются в широких пределах при изменениях режима его работы.

3. Конструкционные стали имеют высокий температурный коэффициент сопротивления. Поэтому сопротивление нагревателя в холодном состоянии намного меньше такового в рабочем, из-за чего неизбежны пусковые толчки тока, длящиеся десятки секунд и более.

4. Практика использования стальных нагревателей показывает, что при малой площади сечения нагревателя даже незначительная коррозия или механическое уменьшение площади сечения увеличивает в этом месте мощность и температуру, а так как железо обладает большим положительным ТКС, это вызывает дальнейшую концентрацию мощности на слабом участке. Если теплоотдача от этого участка затруднена, то температура на нем поднимается до уровня быстрого окисления, и нагреватель перегорает. При площади сечения более $8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ влияние этих явлений ослабевает вследствие большей теплопроводности вдоль нагревателя и меньшего относительного влияния местной коррозии и повреждений на площадь поперечного сечения.

5. Конструкционная сталь сильно окисляется при температурах выше $400 \text{ }^\circ\text{C}$ и существенно корродирует при нормальной температуре. Работоспособными следует считать нагреватели диаметром более $(8-10)10^{-3} \text{ м}$.

6. В связи с тем, что для стальных нагревателей необходимо использовать большие площади сечения (для обеспечения длительных сроков службы), а удельное электрическое сопротивление стали сравнительно мало, сопротивление одиночного нагревателя получается также незначительным. Поэтому следует иметь нагреватели большой длины (при значительной мощности установки) либо применять для их питания понижающие трансформаторы.

7. Масса материала, благодаря большой площади сечения у стальных нагревателей, во много раз превосходит соответствующие значения у нагревателей из специальных сплавов.

8. Так как железо ферромагнитное, индуктивность выполненного из него нагревателя существенна, что приводит к снижению коэффициента мощности до $(0,8-0,9)$; у нагревателей из специальных сплавов $\cos \varphi \approx 1$.

Таблица 1.3

Физические и механические характеристики сплавов высокого электрического сопротивления [2]

Марка сплава	KANTHAL						NIKROTHAL						NIFETHAL		
	APM	A-1	A	AF	AE	D	ALKROTHAL	80	70	60	40	20	70	52	
Максимальная рабочая температура, °С	1425	1400	1550	1300	1300	1300	1100	1200	1250	1150	1100	1050	600	600	
Состав Сг Al Fe Ni	22	22	22	22	22	22	15	20	30	15	20	24	–	–	
	5,8	5,8	5,3	5,3	5,3	4,8	4,3	–	–	–	–	–	–	–	
	остальное						–	–	остальное						
	–	–	–	–	–	–	–	80	70	60	35	20	70	52	
Плотность, 10 ³ кг/м ³	7,10	7,10	7,15	7,15	7,15	7,25	7,28	8,30	8,10	8,20	7,90	7,80	8,45	8,20	
Удельное электрич. сопротив. при 20 °С, 10 ⁻⁶ Ом·м	1,45	1,45	1,39	1,39	1,39	1,35	1,25	1,09	1,18	1,11	1,04	0,95	0,21	0,37	
Отношение удельных сопротивлений ρ_t/ρ_{20} , при температуре, °С	250	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,04	1,08	1,12	2,05	1,93
	500	1,01	1,01	1,03	1,03	1,03	1,03	1,05	1,05	1,05	1,08	1,15	1,21	3,40	2,77
	800	1,03	1,03	1,05	1,05	1,05	1,06	1,10	1,04	1,04	1,10	1,21	1,28	–	–
	1000	1,04	1,04	1,06	1,06	1,06	1,07	1,11	1,05	1,05	1,11	1,23	1,32	–	–
	1200	1,05	1,04	1,06	1,06	1,06	1,08	–	1,07	1,06	–	–	–	–	–
Теплопроводность при 50 °С, Вт/(м·°С)	11	11	11	11	11	11	16	15	14	14	13	13	17	17	

Окончание табл. 1.3

Марка сплава	KANTHAL						NIKROTHAL						NIFETHAL	
	APM	A-1	A	AF	AE	D	ALKROTHAL	80	70	60	40	20	70	52
Удельная теплоемкость при 20 °С, кДж/(кг·°С)	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,50	0,50	0,52	0,50
Точка плавления (приблизительно), °С	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1400	1380	1390	1390	1380	1430	1435
Усилие ползучести (диаметр 1,0 мм) 10 ⁻⁶ Н/м ²	680	680	725	700	720	670	630	810	820	730	675	675	640	610
Предел текучести, 10 ⁻⁶ Н/м ²	470	545	550	500	520	485	455	420	430	370	340	335	340	340

Таблица 1.4

Максимальная рабочая температура сплавов в воздухе, °С [2]

Сплав	Диаметр, 10 ⁻³ м			
	0,15...0,40	0,41...0,95	1,0...3,0	> 3,0
KANTHAL AF	900–1100	1100–1225	1225–1275	1300
KANTHAL A	925–1050	1050–1175	1175–1250	1350
KANTHAL AE	950–1150	1150–1225	1225–1250	1300
KANTHAL D	925–1025	1025–1100	1100–1200	1300
NIKROTHAL 80	925–1000	1000–1075	1075–1150	1200
NIKROTHAL 60	900–950	950–1000	1000–1075	1150
NIKROTHAL 40	900–950	950–1000	1000–1050	1100

Таблица 1.5

Удельное электрическое сопротивление углеродистых сталей, ·10⁻⁶ Ом·м, в зависимости от температуры

Марка стали	Температура, °С					
	20	50	100	200	300	400
Ст10	0,142	0,159	0,190	0,263	0,352	0,456
Ст20	0,172	0,187	0,219	0,292	0,381	0,487
Ст40	0,174	0,189	0,225	0,294	0,387	0,493
Ст45	0,212	0,226	0,257	0,329	0,418	0,522

Полупроводниковые керамические материалы на основе карбида кремния, хромита лантана и дисилицида молибдена используют при температуре в воздухе соответственно до 1400, 1700 и 1850 °С [4]. Они обладают электронным типом проводимости и свойствами, типичными для полупроводников. Особенностью этих материалов является значительное снижение электрического сопротивления с температурой (рис. 1.3, 1.4). Номинальное электрическое сопротивление указано на одном из выводов нагревателя при калибровочной температуре, которая различается в зависимости от производителя и материала, например, 800, 1050, 1200 °С.

Разброс сопротивления от номинальной величины достигает от 10 до 20 %. Хромитлантановые нагреватели в отличие от карбидкремниевых, практически не изменяют свои характеристики в процессе эксплуатации. Дисилицидмолибденовые нагреватели устойчивы к резким перепадам температуры.

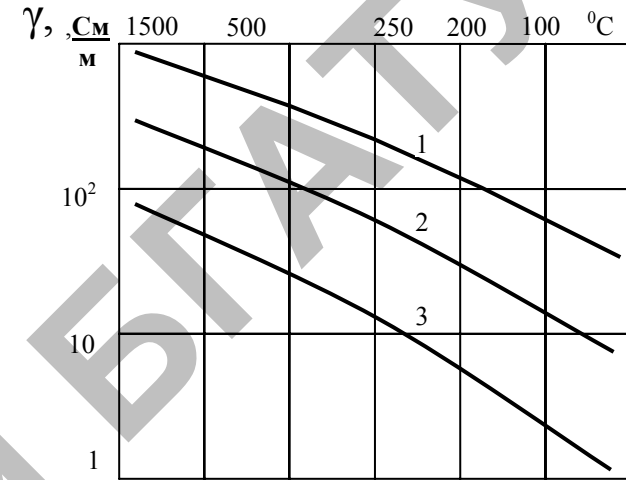


Рис. 1.3. Зависимость удельной электрической проводимости хромита лантана от температуры:
1 — токовывод; 2 — активная (греющая) часть; 3 — исходный материал без добавок

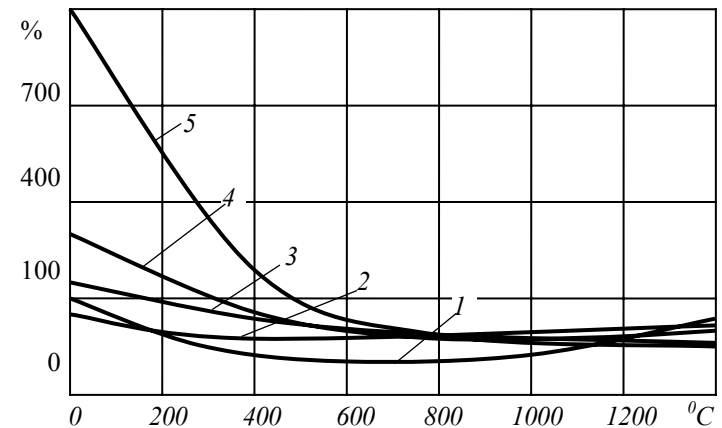
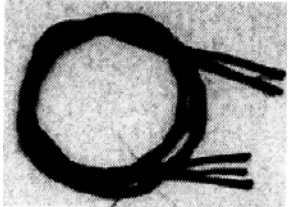


Рис. 1.4. Зависимость относительного удельного сопротивления материалов от температуры:
1 — Crusilite; 2 — Globar LL; 3 — Globar SG; 4 — Hot Rod; 5 — Silit Et

Неметаллические электронагревательные материалы получают путем пропитки полиакрилонитрильных, углеродистых и других волокон и нитей водным раствором, например, угольно-графитовой пыли, хлористого аммония, хлорида меди или алюминия и другими с последующей сушкой и термообработкой для получения требуемой электрической проводимости. Конструктивно нагревательные материалы выполняют в виде нитей, лент, тканей [5, 6]. В табл. 1.6–1.11 даны технические характеристики некоторых тканевых нагревательных материалов. Характеристики зависят от температуры стабилизации при изготовлении тканей (табл. 1.9). Максимальная рабочая температура углеграфитовых нагревателей не превышает 250 °С.

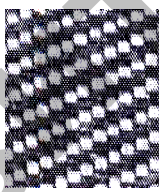
Углеродные нити

Таблица 1.6

Линейная плотность, текс	Линейное сопротивление, Ом/м	
70±3	620±30	
100±5	490±20	
135±5	320±20	
205±10	200±10	
400±10	120±10	

Углеродные ленты

Таблица 1.7

Ширина, мм	Толщина, мм	Вес 1 пог. м, г	Линейное сопротивление, Ом/м	
15±1,0	0,6±0,1	4,0–4,5	15,0±2,0	
20±2,0	0,6±0,1	5,5–6,0	15,5±2,0	
40±2,0	0,5±0,1	11,0–11,5	8,2±1,0	
100±5,0	0,5±0,1	28,0–28,5	3,0±0,5	
550±10,0	0,5±0,1	160,0–180,0	1,0±0,5	

Комбинированные ленты и ткани

Таблица 1.8

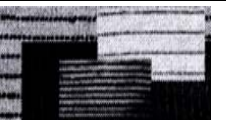
Ширина, мм	100–800	
Толщина, м	0,5–1,0	
Линейное сопротивление, Ом/м	1,5–20,0	

Таблица 1.9

Зависимость удельного сопротивления углеродных материалов НПЦ «УВИКОН» от температуры обработки

Температура обработки, °С	250	500	1000	1500	2000
Удельное сопротивление, Ом·м	$1 \cdot 10^3$	8,0	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$

Таблица 1.10

Углеродно-графитовая ткань ЭТАН-1

Температура термообработки, °С	2200
Полотно: ширина, м	0,55
длина, м	5,0
масса, кг/м ²	0,35
Усилие разрыва полоски ткани шириной 0,05 м, кгс	10
по утку	55
по основе	
Электрическое сопротивление полоски ткани длиной 1 м, шириной 1 мм, Ом	400–600
по утку	
по основе	2500–350
Влажность, % от массы ткани, не более	3,0

Таблица 1.11

Углерод-углеродный армированный материал

Характеристики	Марка материала	
	УКПМ-2	УКПМ-3
Температура термообработки, °С	1850–2100	2800–3000
Плотность, кг/м ³	1250–1420	1300–1350
Прочность при изгибе, кгс/м ²	$600 \cdot 10^4$	$600 \cdot 10^4$
Линейное сопротивление, Ом/м	$(40–60)10^{-6}$	$(10–14)10^{-6}$

Материал УКПМ выпускают в виде пластин 1,5×1,5 м, толщиной 0,8–40,0 мм; цилиндров диаметром до 2,2 м, высотой 0,2–1,0 м и толщиной стенки 1,5–30,0 мм.

Неметаллические нагревательные провода с нагревательной жилой из углеродного волокнистого материала выпускают с изоляцией из фторопласта (марка ПШУФ) и кремнийорганической резины (марка ПШУС) в поливинилхлоридной оболочке. Достоинство этих проводов состоит в высоком электрическом сопротивлении, стойкости к окружающей среде. Электрическое сопротивление может быть 120 и 220 Ом/м. Напряжение питания до 220 В. Максимальная температура оболочки до 180 °С, оптимальная – до 80 °С. Диаметр провода – 1,5 и 2,0 мм. Наработка на отказ 100 тыс. часов. Срок хранения до 10 лет.

1.4. Нагревательные элементы

Конструктивное исполнение и технические характеристики нагревательных элементов в значительной мере зависят от физических свойств и геометрической формы нагревательного материала.

Металлические нагревательные элементы изготавливают чаще всего из проволоки и ленты, поэтому их изгибают в виде спирали или зигзага (рис.1.5).

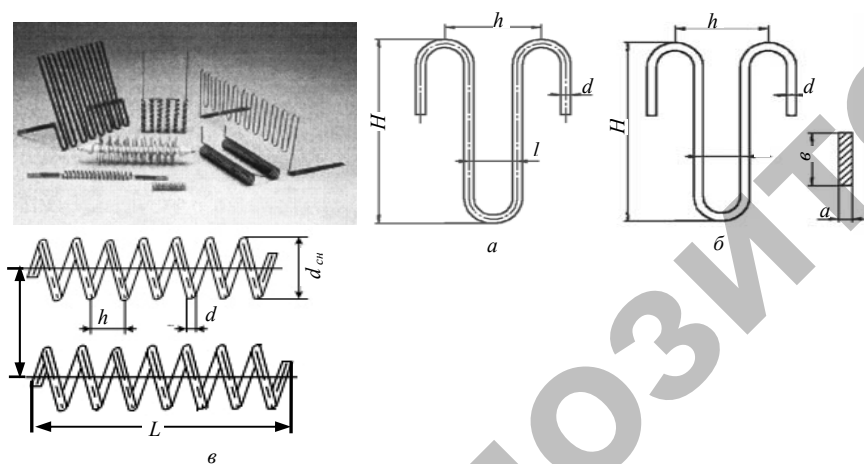


Рис. 1.5. Внешний вид и основные геометрические размеры проволочного (а) и ленточного (б) зигзагообразных и спиральных (в) нагревательных элементов: а, в – толщина и ширина металлической ленты; d, d_{сп} – диаметр проволоки и наружной спирали; l, H – ширина и высота зигзага; h – шаг

Конструктивное исполнение весьма разнообразно, при общей схожести и затруднительно для классификации. Чаще всего предприятия приобретают проволоку или ленту и из нее изготавливают нагревательные элементы требуемого размера, конфигурации и необходимой электрической мощности.

Полупроводниковые керамические нагревательные элементы изготавливают в виде прямых или изогнутых стержней и труб различного диаметра и длины (рис. 1.6, 1.7). Чаще всего нагреватель состоит из трех частей: центральная нагревающая и две концевых холодных, служащих для подключения к электрической сети. Их изготавливают из материала, различающегося по величине электропроводности более чем в 3 раза. Уменьшение сечения нагревающей части может дополнительно увеличить ее сопротивление на 30–40 %. Места контактов для подключения электрического напряжения пропитывают кремнием высокой проводимости или металлизуют, например алюминием, серебром и др. Диапазон, в котором находятся технические характеристики некоторых нагревательных элементов, дан в табл. 1.12–1.14.

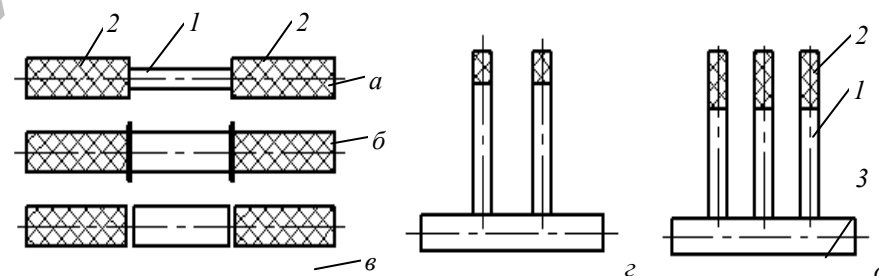


Рис. 1.6. Конструктивные схемы и условные обозначения карбидкремниевых нагревательных элементов: а – КЭН АПС (DTEF); б – КЭН ВПС (LL, ED); в – КЭН БС (ST); з – П-образный (ED-U); д – Ш-образный (ED-3, VE-3); 1 – рабочая нагревательная часть; 2 – выводы; 3 – перемычка

Условные обозначения: КЭН – карбидкремниевый электрический нагреватель; А, Б, В – класс нагревателей; П – выводы пропитаны металлизированным кремнием; С – рабочая часть и выводы склеены.

Таблица 1.13

Технические характеристики хромититановых
нагревательных элементов ЛАНТРЕМ

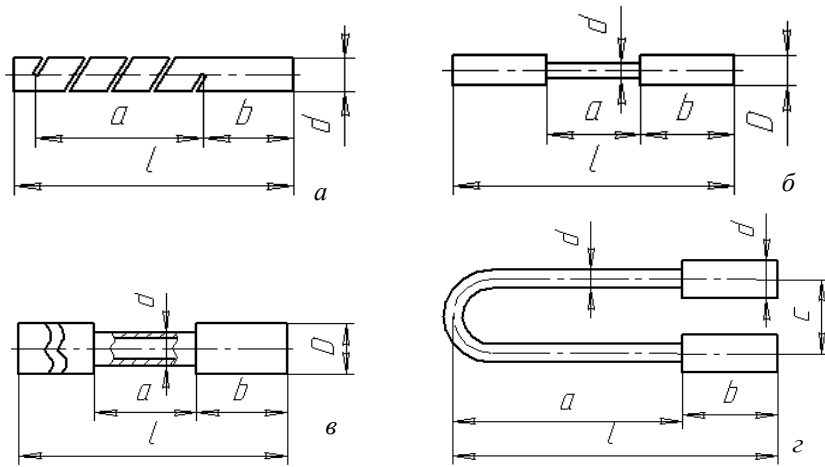


Рис. 1.7. Конструктивные схемы нагревательных элементов ЛАНТРЕМ
C (a), K(б), T(в), U(г)

Характеристики	Обозначение нагревателя				
	C	T	K	U	
Сопротивление при 1200 °С, Ом	15–30	1,5–3,0	10–28	26–48	
Площадь рабочей поверхности, 10 ⁻⁴ м ²	50–160	95–235	38–340	65–175	
Максимальная мощность, Вт при температуре, °С	480–1250	840–2040	420–3420	480–1260	
	300–750	540–1380	275–2280	240–600	
Размеры, мм (см. рис. 1.7) d	16, 20	25, 32	8–18	8, 10	
	D	–	40, 48	14–25	
	a	100–250	150, 200	150–600	100–250
	в	110–200	150	85–300	100, 150
	l	320–650	450, 500	350–1200	200–400
	c	–	–	–	60

Таблица 1.12

Технические характеристики карбидкремниевых
нагревательных элементов КЭН

Характеристики	Обозначение нагревателя		
	КЭН АПС	КЭН ВПС	КЭН БС
Массовая доля SiC, не менее, %	97,0	97,0	97,0
Напряжение питания, В	149–44	150–35	150–100
Сила тока, А	93–19	200–19	140–70
Удельная поверхностная мощность при температуре 1100 и 1400 °С, 10 ³ Вт/м ²	150 и 50	150 и 50	150 и 50
Сопротивление нагревателя при 1200 °С, Ом	0,5–7,15	0,2–4,5	0,85–2,15
Диаметр, мм, рабочей части выводов	8–30	14–45	18–30
	12–45	14–45	18–30
Общая максимальная длина, м	3,0	3,0	1,5

Таблица 1.14

Технические характеристики некоторых карбидкремниевых
нагревательных элементов KANTHAL

Характеристики	Обозначение нагревателя				
	Hot Rod	Globar LL	Silit Et	Cru-silite	Globar SG
Максимальная температура в воздухе, °С	1625	1540	1625	1575	1650
Максимальная удельная поверхностная мощность, 10 ³ Вт/м ² , при температуре, °С	120	130	150	300	100
	1200	1200	1200	1050	1200
Диаметр рабочей части, мм	9,5–44,0	7,9–54,0	7,9–54,0	10–108	12,7–54,0
Длина рабочей части, м	2,0	2,5	0,6–2,5	0,3–1,0	0,65–1,35
Длина нагревателя, м	2,5–3,0	3,3	0,98–3,3	0,6–1,6	1,25–2,2

1.5. Расчет нагревательных элементов

Задача расчета состоит в определении геометрических размеров нагревательного элемента, при которых его температура не превышает допустимую, а мощность соответствует расчетной величине. Расчетными геометрическими размерами чаще всего являются: сечение (диаметр или размеры сторон) и длина проволоки, прутка, ленты, из которых изготавливают нагревательный элемент; количество витков, зигзагов и их шаг; длина и диаметр спирали и пр.

Исходными данными к расчету служат: расчетная мощность, напряжение питания, условия теплоотдачи, конструктивное исполнение нагревателя, температура нагревательного элемента, поверхности нагревателя и среды, материал нагревательного элемента, параметры его электро- и теплофизических характеристик и т. п.

В настоящее время наиболее распространены методы расчета нагревательных элементов по удельной мощности и по рабочему току нагревателя.

Расчет по удельной мощности. В электрическом нагревателе имеет место баланс мощности. Мощность, выделяющаяся в нагревательном элементе, Вт,

$$P = \frac{U^2}{R_t} = \frac{U^2 S}{\rho_t l} = I^2 \rho_t \frac{l}{S}, \quad (1.19)$$

равна мощности, отдаваемой в нагреваемую среду, Вт

$$P = \frac{(t_{нэ} - t_c) A}{r_T} = \varphi A, \quad (1.20)$$

$$I^2 \rho_t \frac{l}{S} = \varphi A, \quad (1.21)$$

где U, I – напряжение на нагревателе и сила тока, В, А;

R_t, ρ_t – сопротивление нагревателя, Ом; и удельное сопротивление материала нагревательного элемента при температуре t , Ом·м;

l, S – длина и площадь поперечного сечения нагревательного элемента, м, м²;

$t_{нэ}, t_c$ – температура нагревательного элемента и нагреваемой среды, °С;

A – площадь поверхности нагревательного элемента, м²;

r_t – термическое сопротивление теплопередачи от нагревательного элемента к среде, м² °С/Вт;

φ – удельная поверхностная мощность, отдаваемая нагревательным элементом, Вт/м².

Если нагревательный элемент выполнен из проводника круглой формы, диаметр которого d (рис. 1.5), то

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad A = \pi d l. \quad (1.22)$$

Подставив (1.22) в (1.21), получим:

$$\frac{4\rho_t}{\pi d^2} I^2 = \varphi \pi d. \quad (1.23)$$

Диаметр нагревательного элемента, из (1.23):

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 \varphi}}. \quad (1.24)$$

Длина проводника нагревательного элемента, после подстановки (1.24) в (1.23), равна:

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\rho_t \pi \varphi^2}}. \quad (1.25)$$

Для нагревателя прямоугольной формы с отношением сторон $b/a = m$ (рис. 1.5) расчетные формулы получают аналогично, подставляя в (1.21):

$$S = a\epsilon, \quad A = 2a(m+1)l.$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_t P^2}{2m(m+1)U^2 \varphi}}. \quad (1.26)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{mPU^2}{4\rho_t(m+1)^2 \varphi^2}}. \quad (1.27)$$

Таким образом, по формулам (1.24)–(1.27) можно рассчитать основные размеры проводника нагревательного элемента. Трудность пользования этими формулами состоит в том, что величина φ сама зависит от искомых размеров d , a , l , температуры нагревательного элемента и условий теплоотдачи. Поэтому сначала находят зависимость удельной мощности от диаметра или толщины проводника из (1.24) и (1.26), а потом по этим зависимостям определяют размеры проводника, отвечающие условию:

$$\varphi_1 = \varphi_2. \quad (1.28)$$

Удельная поверхностная мощность, Вт/м², выделяющаяся в проводнике:

цилиндрической формы

$$\varphi_1 = \frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 d^3}, \quad (1.29)$$

прямоугольной формы

$$\varphi_1 = \frac{\rho_t P^2}{2m(m+1)U^2 a^3}. \quad (1.30)$$

Удельная поверхностная мощность, Вт/м², отдаваемая нагревательным элементом, из (1.20):

$$\varphi_2 = \frac{t_{нэ} - t_c}{r_t}. \quad (1.31)$$

В (1.31) размеры нагревательного элемента входят в формулу термического сопротивления теплопередачи r_t .

Равенство (1.28) находят графически или аналитически, подставляя значения d в (1.29) или a в (1.30) и в (1.31). Диаметр или толщину a и значение φ , при которых выполняется условие (1.28), принимают для дальнейших расчетов, округлив их до ближайшего приемлемого значения.

Важно помнить, что нельзя принимать произвольно диаметр или ширину (площадь сечения) проводника, а его длину рассчитывать по (1.25) или (1.27).

Необходимо вначале вычислить площадь сечения по (1.24), (1.26), а потом определить длину проводника.

Термическое сопротивление r_t зависит от конструкции нагревателя и способа теплопередачи. В табл. 1.15 даны некоторые конструктивные схемы и формы для расчета термического сопротивления в случае теплопередачи *теплопроводностью* [7].

При теплопередаче *конвекцией* можно использовать следующие соотношения, принимая во внимание, что $r_t = 1/\alpha$.

Коэффициент свободной конвективной теплоотдачи:
от плоской поверхности к воздуху

$$\alpha = 2,56 \sqrt[4]{t_{нэ} - t_c}, \quad (1.32)$$

открытой спирали, обдуваемой воздухом,

$$\alpha = 2,5 \mathcal{G}^{0,446} / d^{0,534}, \quad (1.33)$$

где \mathcal{G} – скорость движения воздуха, м/с.

Поперечное обтекание спиральных проволочных и зигзагообразных ленточных нагревателей при числах Рейнольдса:

$$R_e \leq 1000$$

$$\alpha = 10,79 \frac{\lambda^{0,62} C^{0,38}}{\mu^{0,09}} \frac{\rho^{0,47} \mathcal{G}^{0,47}}{d_{нэ}^{0,53}}, \quad (1.34)$$

$$R_e \geq 1000$$

$$\alpha = 2,73 \frac{\lambda^{0,62} C^{0,38} \rho^{0,62} g^{0,62}}{\mu^{0,24} d_n^{0,38}}, \quad (1.35)$$

где λ – теплопроводность газа, Вт/(м·°С);
 С – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·°С);
 ρ – плотность газа, кг/м³;
 g – скорость движения газа, м/с;
 μ – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;
 d_n – диаметр нагревательного элемента (спирали, стержня, прутка, ленты, трубки и т. п.), м.

При теплопередаче *излучением* от проволочных и ленточных нагревательных элементов для определения предельно допустимой удельной поверхностной мощности нагревателя пользуются понятием «идеальный нагреватель» – нагреватель, который образует с изделием две сплошные параллельные бесконечные плоскости и передает весь тепловой поток нагреваемому изделию [3]. Для идеального нагревателя, Вт/м²,

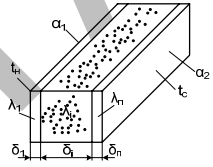
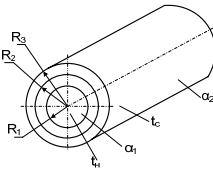
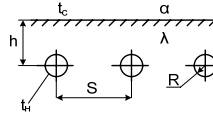
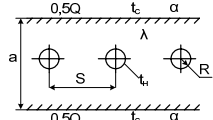
$$\varphi_{ид} = C_{пр} [(T_n / 100)^4 - (T_i / 100)^4], \quad (1.36)$$

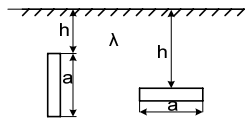
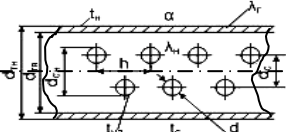
где T_n, T_i – температуры нагревателя и изделия, К;
 $C_{пр}$ – приведенный коэффициент лучеиспускания системы «идеальный нагреватель»–изделие, Вт/(м²К⁴).

$$C_{пр} = 5,7 / (1/\epsilon_n + 1/\epsilon_i - 1), \quad (1.37)$$

где ϵ_n, ϵ_i – относительные коэффициенты лучеиспускания материалов нагревателя и изделия соответственно (прил. 4).

Термические сопротивления тел при теплопередаче теплопроводностью

Форма тела	Расчетная схема	Термическое сопротивление тела без учета теплоотдачи на контурах, м ² ·°С/Вт
1. Плоская многослойная протяженная стенка (стенки теплоизолирующие водонагревателей, печей)		$r_T = \sum_{i=0}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$
2. Цилиндрическая многослойная стенка (стенки водонагревателей, трубки индукторов, нагревательные провода)		$r_T = \sum_{i=0}^n \frac{R_{i+1}}{\lambda} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}$ $R_{i+1} = 0,5(R_i + R_{i+1})$
3. Ряд одинаковых труб с одинаковой температурой в полуограниченном массиве (электрообогреваемые полы)		Для одной из труб $r_T = \frac{R}{\lambda} \ln \left[\frac{S}{\pi R} sh \left(\frac{2\pi h}{S} \right) \right]$
4. Ряд одинаковых труб с одинаковой температурой в массиве, ограниченном плоскостями (электронагреваемые панели, коврики, ленточные нагреватели)		Для одной из труб $r_T = \frac{R}{\lambda} \ln \left[\frac{S}{\pi R} sh \left(\frac{\pi a}{2S} \right) \right]$

<p>5. Протяженная тонкая пластина в полуограниченном массиве (ленточный нагреватель)</p>		<p>$0,5 \leq h/a \leq 12$ Вертикальная пластина $r_T = \frac{0,42a}{\lambda} \left(\frac{h}{a}\right)^{0,24}$ горизонтальная пластина $r_T = \frac{0,34a}{\lambda} \left(\frac{h}{a}\right)^{0,32}$</p>
<p>6. Спираль в трубе, заполненной массивом (трубчатые электрические нагреватели)</p>		<p>$r_T = r_{ТИ} + r_{ТТ}$, $r_{ин} = \frac{d_{ин}}{2\lambda_{ин}} \left[\ln \frac{d_{тн}}{d_c} + 10^{-3} \left(0,5 + 0,59 \frac{d}{d_c} \right) \left(\frac{h}{d} - 1 - 6,65 \left(\frac{d}{d_{ТВ}} \right) \right) \right]$, $r_{ТТ} = \frac{d_{ТЗ}}{2\lambda_T} \ln \frac{d_{ТН}}{d_{ТВ}}$, $d_{инз} = \sqrt{d_{сн} d_{ТВ}}$, $d_{ТТ} = \sqrt{d_{ТВ} d_{ТН}}$, $d_{сн} = d_c + d$</p>

Предельно допустимая удельная поверхностная мощность реального нагревательного элемента, работающего при той же температуре на поверхности, что и у идеального нагревателя, Вт/м²,

$$\varphi_p = \varphi_{ид} \alpha_{эф} \alpha_r \alpha_c \alpha_p \quad (1.38)$$

Применительно к проволочным и ленточным нагревательным элементам значения коэффициентов в (1.38) даны в табл. 1.16 и на рис. 1.8–1.10. Геометрические размеры нагревательных элементов показаны на рис. 1.5. Коэффициент эффективности излучения нагревателя $\alpha_{эф}$ дан для минимально допустимых расстояний (табл. 1.16).

Зависимость $\alpha_{эф}$ от конструкции нагревателя

Параметр	Тип нагревателя (рис. 1.5)					
	зигзагообразный			спиральный		
	проволочный	ленточный (открытый)	ленточный в балках или выемных рамках	на трубке	на полочке	на балках типа САН
Значение $\alpha_{эф}$	0,68	0,4	0,34	0,32	0,32	0,22
Минимальное относительное расстояние	$\frac{e}{d} = 2,75$	$\frac{e}{b} = 0,9$	$\frac{e}{b} = 0,9$	$\frac{h}{d} = 2,0$	$\frac{h}{d} = 2,0$	$\frac{h}{d} = 2,0$

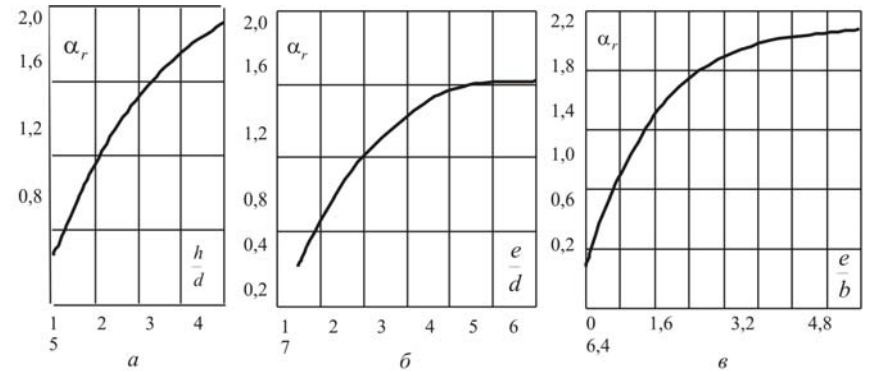


Рис. 1.8. Значение коэффициента α_r для проволочного спирального (а), проволочного зигзагообразного (б) и ленточного зигзагообразного (в) нагревателей

Коэффициент шага α_r учитывает зависимость допустимой удельной поверхностной мощности от основного геометрического соотношения – относительного виткового расстояния (e/d , e/b , h/d).

Влиянием всех других геометрических размеров нагревателя можно пренебречь.

Коэффициент α_c учитывает влияние на допустимую удельную поверхностную мощность реального приведенного коэффициента лучеиспускания системы (рис. 1.9):

$$C_{np} = \frac{5,7}{\left[\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{A_n}{A_{ct}} \left(\frac{1}{\epsilon_n} - 1 \right) \right]}, \quad (1.39)$$

где A_n – тепловоспринимающая площадь поверхности изделия, м²;

A_{ct} – площадь поверхности стен печи, занятая нагревателями, м².

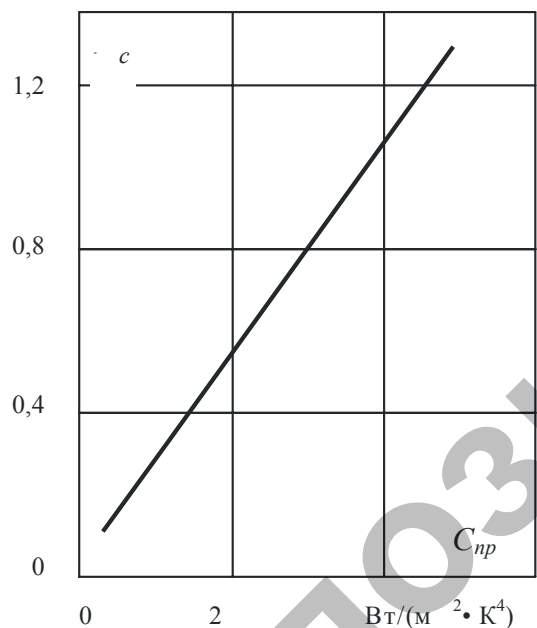


Рис. 1.9. Зависимость коэффициента α_c от приведенного коэффициента лучеиспускания C_{np} .

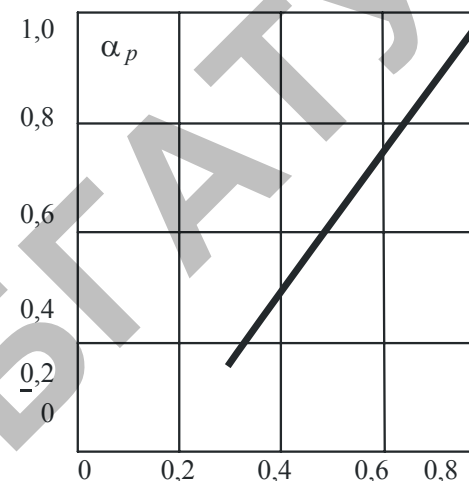


Рис. 1.10. Зависимость коэффициента α_p от отношения A_n / A_{ct} .

Коэффициент α_p учитывает влияние относительных размеров изделия на допустимую удельную поверхностную мощность (рис. 1.10): при $A_n / A_{ct} \geq 0,8$ $\alpha_p = 1$. В качестве A_n принимают площадь поверхности, обращенной к нагревателям. Для нагреваемых тел сложной формы за расчетное значение A_n принимают площадь огибающей поверхности. Использование площади огибающей поверхности изделия в качестве расчетной возможно лишь при расстоянии между центрами изделий, не превышающем их двойного диаметра. При $A_n / A_{ct} \geq 0,3$ температура изделия может быть принята равной температуре печи. Зависимость удельной поверхностной мощности от температуры нагревателя и изделия для идеального случая теплопередачи излучением показана на рис. 1.11.

Коэффициенты $\alpha_{эф}$, α_r , α_c , α_p справедливы для нагревательных элементов, расположенных в футерованных камерах, когда доля тепловых потерь сравнительно невелика. При существенных тепловых потерях расчет приводит к некоторому занижению значений φ_p .

Таблица 1.17

Зависимость температуры проволоки из нихрома, подвешенной горизонтально в спокойном воздухе при 20 °С, от силы тока и диаметра

Проволока		Температура проволоки, °С						
Диаметр, мм	Сечение, мм ²	200	400	600	700	800	900	1000
		Сила тока, А						
5,00	19,60	52,0	83,0	105,0	124,0	146,0	173,0	206,0
4,00	12,60	37,0	60,0	80,0	93,0	110,0	129,0	151,0
3,00	7,07	22,3	37,5	54,5	64,0	77,0	88,0	102,0
2,50	4,91	16,6	27,5	40,4	46,6	57,5	66,5	73,0
2,00	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
1,80	2,54	10,0	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
1,60	2,01	8,0	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,50	1,71	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,40	1,54	7,3	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,30	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21,0	24,4	27,0
1,20	1,13	6,0	9,8	14,0	15,8	18,7	21,6	24,3
1,10	0,95	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1,00	0,78	4,8	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,90	0,63	4,2	6,7	9,3	10,4	12,3	14,5	16,5
0,80	0,30	3,7	5,7	8,1	9,1	10,8	12,3	14,0
0,75	0,44	3,4	5,3	7,5	8,4	9,9	11,2	12,8
0,70	0,38	3,1	4,8	6,9	7,8	9,1	10,3	11,8
0,65	0,33	2,8	4,4	6,3	7,1	8,2	9,3	10,7
0,60	0,28	2,5	4,0	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,55	0,23	2,2	3,5	5,1	5,8	6,7	7,6	8,7
0,50	0,19	2,0	3,1	4,5	5,2	5,9	6,7	7,7
0,45	0,15	1,7	2,7	3,9	4,4	5,2	5,8	6,7
0,40	0,12	1,5	2,3	3,3	3,8	4,4	5,0	5,7
0,35	0,09	1,3	1,9	2,8	3,3	3,7	4,1	4,7
0,30	0,85	1,0	1,6	2	2,3;2,7	3,0	3,4	3,8
0,25	0,14	0,8	1,3	1,8	2,1	2,4	2,7	3,1
0,20	0,13	0,6	1,0	1,4	1,6	1,8	2,0	2,3
0,15	0,11	0,5	0,6	1,0	1,1	1,3	1,4	1,4
0,10	0,008	0,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

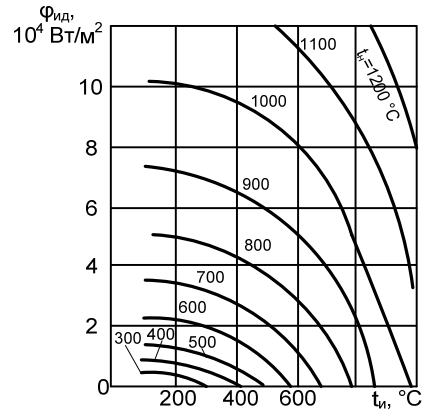


Рис. 1.11. Зависимость допустимой удельной поверхностной мощности от температуры нагревателя t_H и изделия t_P для идеального случая теплопередачи излучением

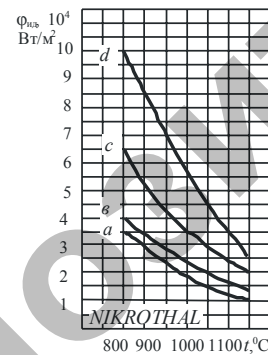
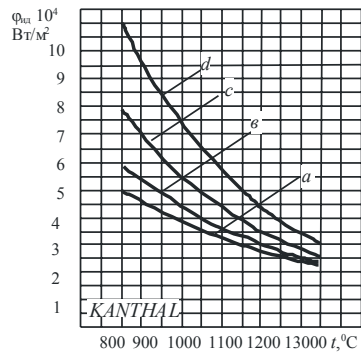
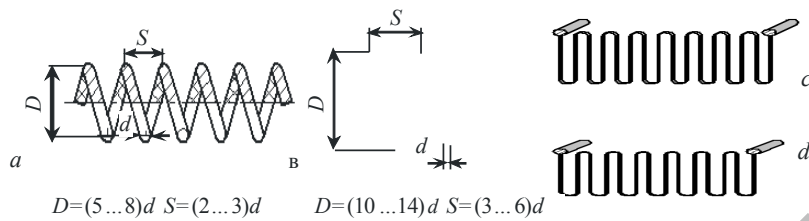


Рис. 1.12. Размеры и допустимая удельная поверхностная мощность нагревательных элементов, рекомендуемые шведским предприятием KANTHAL: a – спираль в пазе; b – спираль на керамической трубке; c – ленточный зигзагообразный нагреватель; d – зигзагообразный нагреватель

Таблица 1.18

Значения коэффициентов монтажа K_m и среды K_c

Конструктивное исполнение нагревателя	K_m
Проволока, натянутая горизонтально	1,0
Проволочная спираль	0,8–0,9
Проволочная спираль на огнеупорном держателе	0,7
Проволока, навитая на огнеупорный держатель	0,6...0,7
Спираль между двумя слоями тепловой изоляции (закрытые электроплитки, трубчатые электронагреватели)	0,5
Нагревательное сопротивление с мощной тепловой изоляцией (электронагреватели в обогреваемых полах)	0,3
Окружающая (нагреваемая среда)	K_c
Нагреватель в потоке воздуха, скорость которого, м/с:	
0	1,0
3	1,8
5	2,1
10	3,1
Нагреватель в воде неподвижной	2,5
в потоке воды	3,0 и более

Коэффициент среды $K_c \geq 1$ учитывает улучшение теплоотдачи в реальном нагревателе по сравнению с теплоотдачей в неподвижном воздухе.

Расчет по рабочему току может быть выполнен в предлагаемой последовательности.

На основании исходных данных (эскиз нагревателя, его мощность и напряжение, материал, температура, удельное сопротивление материала нагревательного провода и пр.) рассчитывают следующие параметры:

– сила тока в нагревательном элементе

$$I = P/U, \quad (1.40)$$

где P , U – мощность нагревательного элемента и напряжение на нем, Вт, В.

– расчетная температура нагревательного элемента, °С,

$$t_p = K_m K_c t_{нэ}. \quad (1.41)$$

Значения K_m и K_c находят, ориентируясь по табл. 1.18.

Температуру $t_{нэ}$ принимают исходя из условий теплоотдачи от нагревательного элемента. Для открытых нагревателей можно рекомендовать $t_{нэ} = (0,7...0,9) t_{доп}$, для герметичных $t_{нэ} \leq 0,8 t_{доп}$. Допустимая температура $t_{доп}$ дана в табл. 1.1–1.5.

По величине I и t_p в табл. 1.17 находят диаметр проволоки d и рассчитывают ее длину.

Длина проволоки нагревательного элемента

$$l = \frac{\pi d^2 U^2}{4 \rho_t P}. \quad (1.42)$$

Другие размеры спирали или зигзага из нихромовой проволоки можно найти по следующим рекомендациям (рис. 1.5): диаметр спирали

$$d_c = (6...10) d, \quad (1.43)$$

высота зигзага из ленты

$$H = 100a. \quad (1.44)$$

Расстояние между центрами соседних витков (шаг спирали) или зигзагов

$$h = (2-6)d, \quad h \geq 2b. \quad (1.45)$$

Количество витков спирали

$$n = \frac{l}{\sqrt{(\pi d_c)^2 + h^2}}, \quad (1.46)$$

зигзагов ленты

$$n = \frac{l}{2h}. \quad (1.47)$$

Длина нагревательного элемента

$$L = hn. \quad (1.48)$$

Для сравнения на рис. 1.12 даны соотношения геометрических размеров нагревательных элементов и допустимые удельные мощности, рекомендуемые предприятием KANTHAL, Швеция. В промышленных печах диаметр проволоки и толщина ленты, лежащих в пазе, должны быть не менее 3 и 2 мм соответственно, для проволочной спирали на керамической трубке – не менее 3 мм, для свободно подвешенных проволочных и ленточных зигзагообразных нагревателей – 5 и 2,5 мм соответственно. При увеличении температуры нагревателя от 900 до 1300 °С расстояние между точками подвеса спирали или зигзага должно соответственно уменьшаться от 300 до 100 мм.

Расчет стальных нагревателей. Сопротивление углеродистых сталей переменному току значительно отличается от сопротивления немагнитных материалов из-за поверхностного эффекта и внутренней индуктивности стальных проводников. Поэтому в формулы (1.24) и (1.25) вводят коэффициент поверхностного эффекта K_n и коэффициент мощности $\cos \varphi$ и рекомендуют рассчитывать размеры проводника нагревательного элемента по следующим формулам:

диаметр стального нагревательного проводника

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_r K_n P^2}{\pi^2 U^2 \varphi \cos^2 \varphi}}; \quad (1.49)$$

его длина

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2 \cos^2 \varphi}{4\rho_r K_n \pi \varphi^2}}. \quad (1.50)$$

Однако диаметр, рассчитанный по (1.49), часто не удовлетворяет требованию по механической прочности. Приходится принимать диаметр проволоки в несколько раз больше расчетного, а нагреватели подключать на пониженное напряжение. В отдельных упрощенных случаях можно принять диаметр проволоки по механической прочности, т. е. более 3 мм, а длину – исходя из конструкции нагревателя. В этом случае расчетной величиной является напряжение питания, которое можно найти из (1.19) с учетом K_n и $\cos \varphi$:

$$U = \sqrt{\frac{\rho_r l P K_n}{S \cos^2 \varphi}}. \quad (1.51)$$

Коэффициент K_n рассчитывают по формулам (1.15), (1.16), значение $\cos \varphi$ находится в пределах 0,82–0,92.

Пример 1.1. Рассчитать открытые спиральные нагреватели из нихрома для воздухоподогревателя мощностью 36 кВт. Температура подогреваемого воздуха $t_c = 25$ °С, скорость движения 5 м/с.

Принимаем 6 нагревателей в виде спирали из нихрома X15H60 ($\rho_{20} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\alpha = 17,0 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹), мощность нагревателя $P = 6$ кВт. Температура спирали $t_n = 600$ °С, $t_{доп} = 1100$ °С. Нагреватели рассчитываем методом удельной мощности.

Термическое сопротивление теплопередачи от спирали к воздуху согласно (1.33):

$$r_T = 1/\alpha = d^{0,534} / 2,59^{0,448}.$$

Находим зависимость удельной поверхностной мощности от диаметра d проволоки спирали по (1.29) и (1.31), предварительно подставив в (1.31) значение r_T . Результаты расчета приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Результаты расчета к примеру 1.1

$d, 10^{-3}$ м	$r_T, 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$	$\varphi_1, 10^3$ Вт/м ²	$\varphi_2, 10^3$ Вт/м ²
1,2	5,36	192,3	107,3
1,4	5,87	120,3	97,9
1,6	6,30	80,6	91,3
и т. д.			

По табл. 1.19 строим графические зависимости φ_1 и φ_2 от d (рис. 1.13а). Принимаем $d = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м, $\varphi_2 = 90 \cdot 10^3$ Вт/м².

Длина проволоки

$$l = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 10^3 \cdot 220^2}{4 \cdot 1,21 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 (90 \cdot 10^3)^2}} = 13,1 \text{ м.}$$

Проверим результаты расчета:

$$P = \frac{U^2 S}{\rho_l l} = \frac{220^2 \cdot 3,14 (1,5 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot 1,21 \cdot 10^6 \cdot 13,1} = 5393,1 \text{ Вт.}$$

Необходимо уменьшить длину проволоки пропорционально отношению мощностей:

$$l = \frac{5393,1}{6000} \cdot 13,1 = 11,77 \text{ м.}$$

Остальные размеры спирали рассчитываем по (1.43)–(1.48).

Пример 1.2. Определить площадь поверхности нагревательных элементов в сушилке с установленной мощностью $P_n = 50$ кВт. Нагреватель – проволочная спираль из нихрома X15Н60, $\rho_{20} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $\epsilon_n = 0,8$; $\epsilon_n = 0,65$; $h/d = 2,5$; максимальная температура сушки 300 °С. Допустимая температура нагревателя технологией не ограничивается и равна 1000 °С. Отношение площади тепловоспринимающей поверхности изделия к площади поверхности стен печи, занятой нагревателями, $A_n/A_{ст} = 0,9$.

Находим на рис. 1.11 по температуре сушки $t_n = 300$ °С и температуре нагревателя $t_n = 1000$ °С допустимую удельную поверхностную мощность $\varphi_{нн} = 9,7 \cdot 10^4$ Вт/м². Определяем по табл. 1.16 $\alpha_{эф} = 0,32$, по рис. 1.8а $\alpha_r = 1,22$.

Приведенный коэффициент лучеиспускания (1.39):

$$C_{нр} = \frac{5,7}{1/0,65 + 0,9(1/0,8 - 1)} = 3,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С).}$$

Из графика на рис. 1.9 $\alpha_c = 0,8$. Поскольку $A_n/A_{ст} > 0,8$, принимаем $\alpha_p = 1$.

Реальная удельная мощность, передаваемая от нагревателей к изделию в сушилке (1.38),

$$\varphi_p = 9,7 \cdot 10^4 \cdot 0,32 \cdot 1,22 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 3,79 \cdot 10^4 = 3,79 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Необходимая площадь поверхности нагревательных элементов составляет:

$$A_n \approx P_p / \varphi_p = 50 \cdot 10^3 / 3,79 \cdot 10^4 = 1,32 \text{ м}^2.$$

Примем 18 нагревателей по 2,8 кВт. Площадь поверхности одного нагревателя $A_1 = 1,32/18 = 0,074$ м².

Примем диаметр проволоки из нихрома $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м.

Тогда длина этой проволоки $l_1 = 0,074/3,14 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 23,6$ м.

Определяем величину напряжения питания нагревателей по формуле (1.19):

$$U = \sqrt{P_p l / S} = \sqrt{4 \cdot 2,8 \cdot 10^3 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 23,6 / 3,14 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2} = 50,7 \text{ В.}$$

В качестве источника питания могут быть использованы трансформаторы печные, позволяющие изменять вторичное напряжение от 25 до 100 % от номинального.

Пример 1.3. Рассчитать нагревательный элемент инфракрасного обогревателя, выполненный в виде спирали из нихромовой проволоки, расположенной в трубке из стекла. Мощность спирали 250 Вт.

Принимаем температуру спирали 800 °С. Согласно табл. 1.18, $K_m = 0,8$; $K_c = 1,1$.

Ток спирали (1.40) $I \approx 250 / 220 \approx 1,14$ А.

Расчетная температура (1.41)

$$t_p = 0,8 \cdot 1,1 \cdot 800 = 704 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По току I и температуре t_p в табл. 1.17 находим диаметр проволоки $d = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м.

Длина проволоки (1.42)

$$l = \frac{220^2 \cdot 3,14 (0,15 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = 3,1 \text{ м}.$$

Пример 1.4. Определить коэффициент поверхностного эффекта для проволоки диаметром $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м из нихрома ($\rho_{20} = 1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) и углеродистой стали ($\rho_{20} = 0,29 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) при частоте $f = 50$ Гц и силе тока $I_1 = 10$ А и $I_2 = 30$ А.

Примем, что температура и другие параметры проволок в обоих случаях остаются одинаковыми.

Амплитудное значение напряженности магнитного поля на поверхности стальной проволоки (1.18) при токе 10 и 30 А:

$$H_{10} = \sqrt{2} 10 / 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ А/м},$$

$$H_{30} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Относительная магнитная проницаемость при этих токах:

углеродистой стали (рис. 1.2) $\mu_{10} = 550$, $\mu_{30} \leq 200$;

нихрома – $\mu_n = 1$.

Глубина проникновения тока (1.17), соответственно,

$$Z_{a10} = 503 \sqrt{0,29 \cdot 10^{-6} / 550 \cdot 50} = 1,63 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$Z_{a30} = 503 \sqrt{0,29 \cdot 10^{-6} / 200 \cdot 50} = 2,58 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$Z_{an} = 71 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Коэффициент поверхностного эффекта (1.15)

$$K_{n10} = 1 + \frac{0,2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{1,63 \cdot 10^{-3}} = 1,37,$$

$$K_{n30} = 1,23,$$

$$K_{nn} = 1,008.$$

Поверхностный эффект при частоте 50 Гц заметно проявляется у ферромагнитных проводников и тем больше, чем меньше плотность тока.

Пример 1.5. Определить необходимую длину проволоки из стали Ст.20 диаметром $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м для обогрева почвы в парнике. Мощность, включаемая на одну фазу, $P = 2,2$ кВт. Напряжение питания – 220 В. Проволока проложена в асфальтобетонном массиве толщиной $80 \cdot 10^{-3}$ м под слоем почвы. Шаг укладки $S = 0,15$ м. Температура на границе почвы и массива $t_c = 25$ °С.

Принимаем температуру проволоки $t_n = 200$ °С. Удельное электрическое сопротивление проволоки при этой температуре $\rho_t = 0,29 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. (табл. 1.5), сила тока $I = 2,2 \cdot 10^3 / 220 = 10$ А, т. е. соответствует условиям примера 1.4.

Следовательно, можно принять из предыдущего примера $K_n = 1,37$.

Термическое сопротивление теплопередачи от проволоки к поверхности массива, согласно табл. 1.15, п. 4:

$$r_r = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{0,83} \ln \left[\frac{0,15}{3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} \operatorname{sh} \left(\frac{3,14 \cdot 80 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,15} \right) \right] = 6,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Удельная поверхностная мощность, передаваемая от проволоки к поверхности массива (1.31),

$$\varphi = \frac{200 - 25}{6,14 \cdot 10^{-3}} = 28,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Длина стальной проволоки (1.50)

$$l = \sqrt[3]{\frac{2,2 \cdot 10^3 \cdot 220^2 \cdot 0,86^2}{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} \cdot 1,37 \cdot 3,14 (28,5 \cdot 10^3)^2}} = 27 \text{ м.}$$

Проверим результаты расчета по мощности, выделяющейся в стальной проволоке:

$$P_p = \frac{U^2 S \cos^2 \varphi}{\rho_l R_{\text{л}}} = \frac{220^2 \cdot 3,14 (3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,86}{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} \cdot 27 \cdot 1,37} = 23,6 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Длина проволоки определена неверно, т. к. выделяющаяся в ней мощность в десять раз больше необходимой. Причина ошибки в том, что диаметр проволоки принят, а не рассчитан по формуле (1.49).

Вычислим диаметр стальной проволоки, величина которого удовлетворяет условию (1.28). Расчет выполнен в последовательности, изложенной в примере 1.1. Результаты расчета представлены в табл. 1.20.

Таблица 1.20

Результаты расчета к примеру 1.5

$d, 10^{-3} \text{ м}$	$r_t, 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$	$\varphi_1, 10^3 \text{ Вт/м}^2$	$\varphi_2, 10^3 \text{ Вт/м}^2$
0,3	1,03	435,55	169,9
0,5	1,50	94,08	116,6
1,0	2,56	11,76	68,3
2,0	4,34	1,47	40,3
3,0	6,14	0,43	28,5

Согласно рис. 1.13, б (точка А), построенному по данным табл. 1.20, диаметр стальной проволоки, удовлетворяющий усло-

вию (1.28), равен примерно $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, что не отвечает требованиям механической прочности.

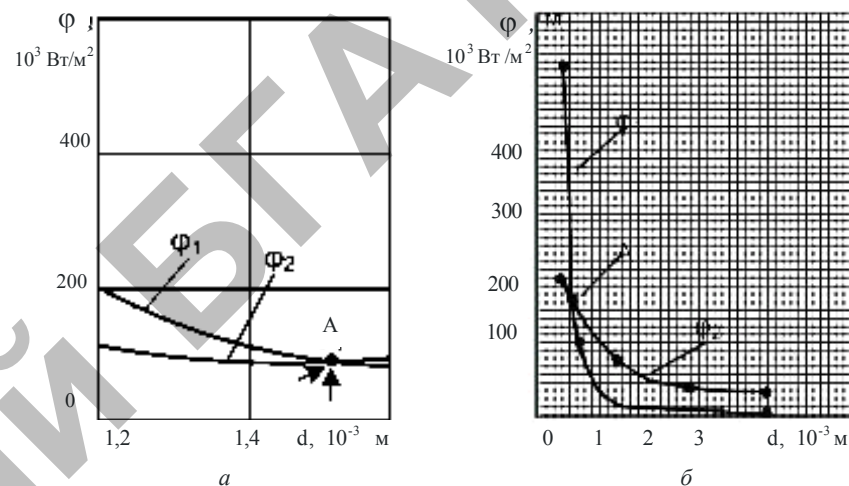


Рис. 1.13. Зависимость удельной поверхностной мощности от диаметра проволоки:
а – пример 1.1; б – пример 1.5

Примем, руководствуясь требованиями механической прочности, диаметр проволоки $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и ее длину на одну фазу 125 м. В этом случае напряжение питания (1.51)

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} \cdot 125 \cdot 2,2 \cdot 10^3 \cdot 1,37}{3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,86^2}} = 81 \text{ В.}$$

В качестве источников питания можно использовать печные трансформаторы, обеспечивающие широкое регулирование вторичного напряжения.

2. ТРУБЧАТЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

2.1. Устройство и характеристики трубчатых электрических нагревателей

Трубчатые электрические нагреватели (ТЭН) предназначены для нагрева газообразных, жидких и твердых сред. Могут быть с подводом напряжения с одного или двух концов, круглой, плоской, прямой, U-образной и другой формы, оребренные.

Двухконцевой ТЭН (рис. 2.1) состоит из металлической оболочки (трубки) 7, в которой размещена спираль 6, соединенная с контактными стержнями 5, наружные выводы 1 которых служат для подключения напряжения. Спираль изолирована от трубки наполнителем 4. Контактные стержни отделены от оболочки керамическими изоляторами 2. Место соединения изоляторов с трубкой и контактными стержнями герметизировано влагостойким лаком 3. Оболочку изготавливают из трубки диаметром от 6 до 16 мм с толщиной стенки от 0,5 до 1,0 мм из углеродистой или нержавеющей стали, меди, латуни. В качестве наполнителя используют электротехнический периклаз (кристаллическая окись магния), который обладает высокими электрическим сопротивлением и теплопроводностью. Герметиками служат кремнийорганические и другие лаки, например КО-08, ВГО-1. Спираль выполняют из нихрома или фехрала. После заполнения наполнителем трубку опрессовывают. Мощность ТЭНов может быть от нескольких десятков ватт до 12 кВт. Температура поверхности трубки до 750 °С.

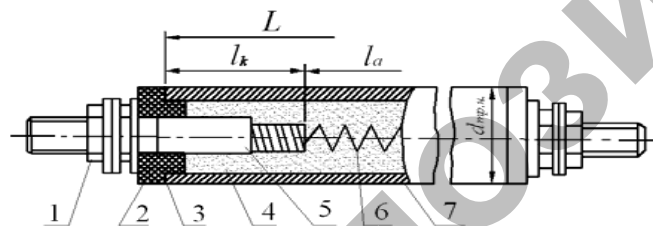


Рис. 2.1. Трубчатый электронагреватель двухконцевой:
1 – контактная часть; 2 – изолятор; 3 – герметик; 4 – наполнитель; 5 – контактный стержень; 6 – спираль; 7 – оболочка; L – развернутая длина; l_a – длина активной (греющей) части; l_k – длина контактного стержня в заделке; $d_{тп}$ – диаметр трубки

Одноконцевой (патронный) ТЭН (рис. 2.2) представляет собой металлическую трубку, внутри которой расположен нагревательный элемент из проволоки, намотанный в виде спирали на керамический сердечник, изолированный от трубки периклазом. Оба вывода спирали расположены с одной стороны трубки и герметизированы так же, как в двухконцевых нагревателях. Другой конец трубки заварен. Диаметр патронных нагревателей может быть от 3 до 20 мм, удельная поверхностная мощность $(4,0-40,0) \cdot 10^4$ Вт/м², температура оболочки до 500 °С.

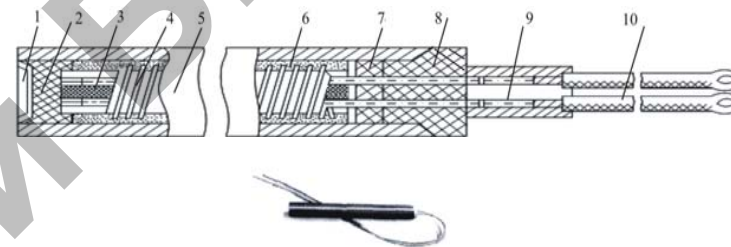


Рис. 2.2. Трубчатый электронагреватель одноконцевой:
1 – доннышко; 2 – шайба; 3 – керамический сердечник; 4 – спираль нагревательная; 5 – оболочка; 6 – периклаз; 7 – шайба верхняя; 8 – изолятор; 9 – стержень контактный; 10 – вывод гибкий

Контактную часть ТЭНов выполняют в виде резьбовой шпильки, контактной пластины, фляжка с отверстиями.

Резьбовая шпилька (рис. 2.3) включает две гайки, три шайбы и изолятор. Для ТЭНов диаметром 6,5; 7,4; 8,0; 8,5; 10,0 мм возможно использование резьбовых переходников М2,5 на М5 и М3 на М5.

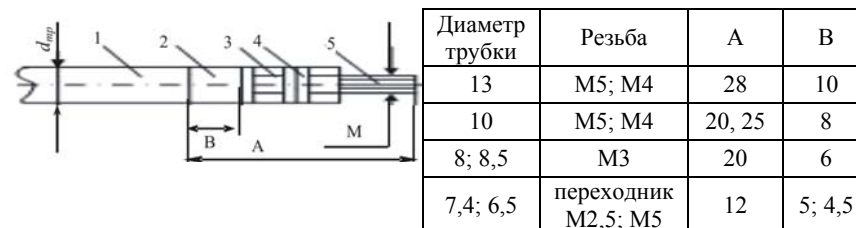


Рис. 2.3. Контактная часть ТЭНа:
1 – трубка; 2 – керамический изолятор; 3 – гайки; 4 – шайбы; 5 – стержень с резьбой

Контактную пластину одинарную или двойную и флажок используют в ТЭНах диаметром 6,5; 7,4; 8,0; 8,5; 10,0 мм. (рис. 2.4).

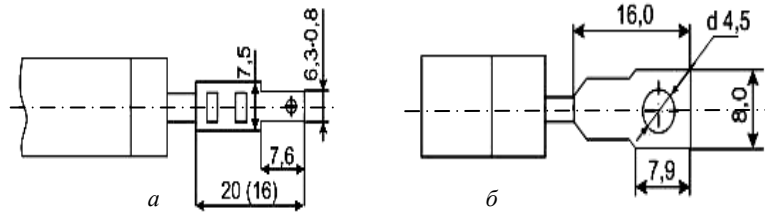


Рис. 2.4. Контактная пластина (а) и флажок (б)

Технические характеристики ТЭНов для промышленных установок регламентированы ГОСТом 13268-88 «Электронагреватели трубчатые». Настоящий стандарт распространяется на двухконцевые электронагреватели круглого сечения, общего назначения, климатического исполнения УХЛ-4, предназначенные для нагрева теплопроводностью, конвекцией, излучением. Условное обозначение и некоторый диапазон технических параметров нагревателей показан на примере продукции Минского завода ТЭНов «Адиполь» (табл. 2.1, прил. 1, 2). ТЭНы для бытовых установок изготавливают согласно ГОСТу 19108-81.

Плоские нагреватели прямой, дисковой и кольцевой формы предназначены для нагрева контактным способом корпусов экструдеров, литьевых форм, топливных фильтров автомобилей, труб и резервуаров. Некоторые из них, производимые предприятием «Номакон» (Минск), показаны на рис. 2.5. и в табл. 2.2–2.4.

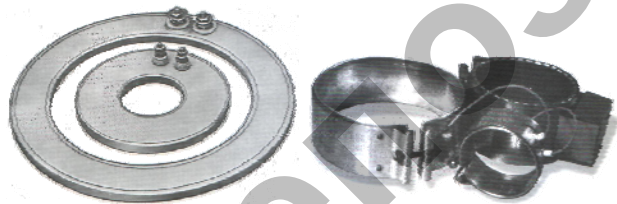


Рис. 2.5. Плоские электрические нагреватели (прямые, дисковые, кольцевые)

Таблица 2.1.

Условное обозначение и характеристики ТЭНов [9]

ТЭН – 100 А 13/2,0 Р 220 Напряжение, В: 12–38

<p>Развернутая длина ТЭН, см: 20...600</p>	<p>К – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 6,5 Вт/см². Нагрев в среде, с движущимся со скоростью не менее 6 м/с воздухом, с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 750⁰С.</p> <p>Ж – Вода, слабый раствор кислот (рН=5-7). Удельная мощность – 15,0 Вт/см². Нагревание, кипение с максимальной температурой на оболочке 100⁰С.</p> <p>Р – Вода, слабый раствор щелочей (рН=5-9). Удельная мощность – 15,0 Вт/см². Нагревание, кипение с максимальной температурой на оболочке 100⁰С.</p> <p>З – жиры, масла. Удельная мощность – 3,0 Вт/см². Температура на оболочке ТЭНа обусловлена вязкостью масла. Нагрев в ваннах и др. емкостях</p> <p>Х – Вода, слабый раствор щелочей и кислот (рН=5-9). Удельная мощность – 9,0 Вт/см². Нагревание, кипение с максимальной температурой на оболочке 100⁰С.</p> <p>Л – Литейные формы, пресс-формы. Удельная мощность – 5,0 Вт/см². Имеется гарантированный контакт с нагреваемым металлом. Нагрев с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 450⁰С</p>	<p>Ор – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 11,0 Вт/см². Нагрев воздуха газов и пр. смесей движущихся со скоростью 6 м/с температура на оболочке ТЭН до 450⁰С.</p> <p>Кр – Воздух и пр.газы и смеси газов. Удельная мощность – 13,0 Вт /см². Нагрев воздуха, газов и пр. смесей, движущихся со скоростью 6 м/с. Температура на оболочке ТЭН до 450⁰С.</p> <p>Тi – Вода, раствор щелочей и кислот. Удельная мощность – 15 Вт/см². Нагревание с максимальной температурой на оболочке 100⁰С. (материал оболочки - титан).</p> <p>W – Легкоплавкие металлы: олово, свинец, и др. Удельная мощность – 3,5 Вт/см². Нагрев и плавление в ваннах и др. емкостях с температурой на оболочке ТЭН до 450⁰С.</p> <p>Материалы корпуса: S,O, P, Z, Op, W – низкоуглеродистая сталь (08, 08Ю, 08КП, 10, 10КП); Т,К, J, Кр – нержавеющая сталь (12Х18Н10Т, 08Х18Н10).</p>
<p>Длина контактного стержня в заделке, мм: А-40; В-65; С-100; D-125; E-160; F-250; G-400; H-630</p>		
<p>Диаметр, мм: 6,5; 7,4; 8,0; 8,5; 10; 13; 16</p>		
<p>Мощность, кВт от 0,2 до 6,3 и более</p>	<p>Рабочая среда: S – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 2,0 Вт/см². Нагрев в спокойной газовой среде до рабочей температуры на оболочке ТЭН до 450⁰С. О – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 5,5 Вт/см². Нагрев воздуха, газов и пр. смесей, движущихся со скоростью 6 м/с. Температура на оболочке ТЭН до 450⁰С. Т– Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 5,0 Вт/см². Нагрев воздуха, газов и пр. смесей в спокойном состоянии с температурой на оболочке ТЭН до 750⁰. К – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 6,5 Вт/см². Нагрев в среде, с движущимся со скоростью не менее 6 м/с воздухом, с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 750⁰С.</p>	
<p>↑ ↑ ↑ ↑ ↑</p>		

Нагревательный элемент – лента или провод из нихрома Х20Н80, намотанные на слюдопласт и изолированные от стального корпуса корпуса также слюдопластом. Удельная поверхностная мощность до $4 \cdot 10^4$ Вт/м² при максимальной температуре 400 °С. При использовании керамической изоляции удельная мощность может быть до $7 \cdot 10^4$ Вт/м², а максимальная температура поверхности нагревателя – 600 °С. Напряжение питания от 12 до 220 В.

Таблица 2.4.

Технические характеристики плоских кольцевых нагревателей

D , мм	H , мм	Вт	D , мм	H , мм	Вт
30	25	105	65	60	550
30	40	165	70	20	195
35	25	120	70	40	395
35	35	170	70	60	590
35	45	220	75	20	210
40	25	140	75	40	420
40	35	195	75	60	635
40	45	250	80	20	225
45	25	155	80	40	450
45	40	250	80	60	675
45	55	345	85	20	240
50	20	140	85	40	480
50	35	245	85	60	720
50	60	420	90	20	250
55	20	155	90	40	505
55	40	310	90	60	760
55	60	460	95	20	265
60	20	165	95	40	535
60	40	335	95	60	800
60	60	505	100	20	280
65	20	180	100	40	560

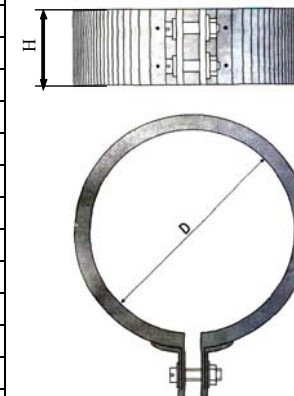


Таблица 2.2.

Технические характеристики плоских прямых нагревателей

Длина, L , мм	Мощность, Вт		
	220 В		
	$B = 25$ мм $H = 4$ мм	$B = 38$ мм $H = 4$ мм	$B = 30$ мм $H = 4$ мм
203	170	240	–
267	310	440	–
305	400	560	–
370	–	–	500
387	550	800	–
400	–	–	600
454	680	1000	–
600	–	–	850
603	970	1400	–
730	1200	1700	–
826	–	1900	–
953	–	220	–

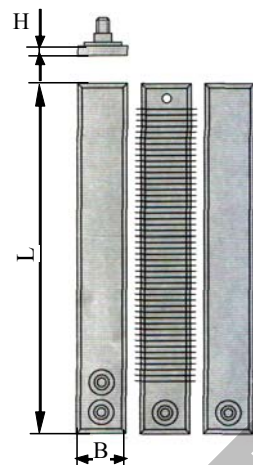
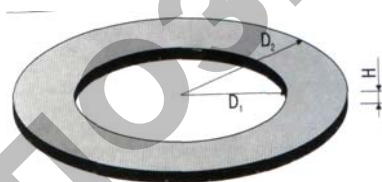


Таблица 2.3.

Технические характеристики плоских дисковых нагревателей

Тип	$H=35$ мм		Мощность, Вт
	D_1	D_2	
К-10	22	88	370
К-20	55	121	570
К-30	90	156	780
К-40	123	189	1000
К-50	158	220	1200



2.2. Выбор трубчатых нагревателей

Трубчатые электрические нагреватели выбирают по мощности, напряжению питания, геометрическим размерам и форме, виду среды и характеру ее нагрева.

Мощность одного нагревателя, Вт,

$$P_1 = P_p / n, \quad (2.1)$$

где P_p – расчетная мощность нагревательного устройства, Вт;
 n – количество нагревателей в устройстве, шт.

Расчетная мощность устройства:
при нагреве:

$$P_p = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau\eta_r}, \quad (2.2)$$

при нагреве и фазовых превращениях (испарение, плавление):

$$P_p = \frac{m[c(t_2 - t_1) + q]}{\tau\eta_r}, \quad (2.3)$$

где m – масса нагреваемого материала, кг;

c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг · °С);

t_1, t_2 – начальная и конечная температура нагрева, °С;

q – скрытая теплота фазового превращения, Дж/кг;

τ – продолжительность нагрева, с;

η_r – тепловой КПД установки.

Величину напряжения на нагревателях чаще всего принимают равной напряжению питания установки.

Геометрические размеры ТЭНа пропорциональны напряжению питания и мощности: чем ниже напряжение и мощность, тем меньше объем нагревателя. Последнее определяет, какое количество ТЭНов можно разместить в нагреваемом объеме. Придавая ТЭНу форму, отличающуюся от прямолинейной, уменьшают его длину, оставляя неизменным объем, и упрощают устройство токоподвода.

Уменьшение диаметра ТЭНа облегчает его гибку и придание различных форм, но снижает площадь теплоотдающей поверхности, в связи с этим могут возрасти удельная поверхностная мощность и температура оболочки, ухудшится прочность изоляции.

Не следует забывать о длине контактных стержней в заделке, которая должна обеспечивать нахождение всей активной зоны нагревателя в среде, даже, например, в случае колебания уровня жидкости в рабочем пространстве:

– достаточное удаление узлов герметизации от активной части ТЭНа и горячей зоны нагревательного устройства;

– размещение контактной части нагревателя в доступном для подключения напряжения месте, отвечающем требованиям безопасности.

Вид среды и характер ее нагрева определяют допустимую удельную мощность φ_n и температуру t_n на поверхности оболочки нагревателя. При этом необходимо соблюдать условие

$$\varphi_n \leq \varphi_c, \quad (2.4)$$

где φ_c – допустимая удельная мощность для нагреваемой среды, Вт/м² (табл. 2.5).

Удельная мощность на поверхности нагревателя, Вт/м²:

$$\varphi_n = P_1 / \pi d_{тр} L_a, \quad (2.5)$$

где $d_{тр}$, L_a – диаметр наружный трубки и активная длина ТЭНа, м (рис. 2.1, табл. 2.1).

При несоблюдении условия (2.4) увеличивается температура нагревательного элемента, оболочки и среды. Это снижает срок службы ТЭНа и качество среды (подгорание, подсыхание и даже возгорание). Поэтому выбранный нагреватель во всех случаях следует проверить по условию (2.4), а при возможности – и по температуре его поверхности, которая не должна превышать допустимую величину для материала оболочки $t_{нд}$ (табл. 2.5) и среды $t_{ср}$.

При достаточной информации о номенклатуре нагревателей (прил. 1, 2), характеристиках среды (табл. 2.5) и мощности нагревательного устройства (2.2), (2.3):

– определяют количество ТЭНов n , которое можно разместить в рабочем пространстве, стремясь равномерно загрузить фазы сети;

– рассчитывают мощность одного ТЭНа P_1 (2.1);

– по мощности P_1 и среде, учитывая геометрические размеры, выбирают предварительно ТЭН (прил. 1, 2);

– рассчитывают удельную поверхностную мощность ТЭНа (2.5).

При соблюдении условия (2.4) принимают окончательно трубчатый нагреватель. В противном случае необходимо подобрать ТЭН с меньшим значением φ_n .

Таблица 2.5.

Условное обозначение рабочей среды и допустимые удельные мощности ТЭНов (согласно ГОСТ 13268-88)

Условное обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Удельная мощность, 10^4 Вт/м ²	Материал оболочки ТЭНа
X	Вода, слабый раствор щелочей и кислот (рН от 5 до 9)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	9,0	Медь и латунь (с покрытием)
Э	Вода, слабый раствор кислот (рН от 5 до 7)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	15,0	Нержавеющая жаростойкая сталь
P	Вода, слабый раствор кислот (рН от 7 до 9)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	15,0	Углеродистая сталь
Q	Вода, слабый раствор кислот (рН от 5 до 7)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	9,5	Алюминиевые сплавы
S	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в спокойной газовой среде до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	2,2	Углеродистая сталь
T	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в спокойной газовой среде до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	5,0	Нержавеющая жаростойкая сталь

Продолжение табл. 2.5.

O	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	5,5	Углеродистая сталь
K	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	6,5	Нержавеющая жаростойкая сталь
R	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	3,5	Углеродистая сталь
N	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	5,1	Нержавеющая жаростойкая сталь
Z	Жиры и масла	Нагрев в ваннах и других емкостях	3,0	Углеродистая сталь
V	Щелочь, щелочноселитровая смесь	Нагрев и плавление с температурой на оболочке ТЭНа до 600 °С	3,5	Углеродистая сталь
W	Легкоплавкие металлы: олово, свинец и др.	Нагрев и плавление с температурой на оболочке ТЭН до 450°С	3,5	Углеродистая сталь
L	Литейные формы, прессформы	ТЭН вставлен в отверстие, гарантирован контакт с нагреваемым металлом. Нагрев с температурой на оболочке ТЭНа до 450 °С	5,0	Углеродистая сталь
Y	Металлические плиты из алюминиевых сплавов	ТЭН залит в изделие. Работа с термоограничителями. Температура на оболочке ТЭНа до 320 °С	13,0	Углеродистая сталь

Окончание табл. 2.5.

Ор	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭНа 450 °С	11,0	Углеродистая сталь с оребрением
Кр	Воздух и прочие газы и смеси газов	Воздух и прочие газы и смеси газов	13,0	Нержавеющая сталь с оребрением
Т	Вода, раствор щелочей и кислот	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	13,0	Титан

Пример 2.1. Выбрать трубчатые нагреватели для электрического водонагревателя, показанного на рис. 2.6, а. Мощность водонагревателя – 12 кВт. Напряжение питания – 380/220В. Характер нагрева – нагревание неподвижной воды от 10 до 90 °С. Размещение ТЭНов примем, как показано на рис. 2.6, б.

Исходя из размеров рабочего пространства и места крепления ТЭНов (рис. 2.5, д) принимаем нагреватели U-образной формы с радиусом закругления 30–50 мм. Развернутая длина ТЭНа может быть до 1000 мм, т. к. диаметр резервуара 560 мм. Диаметр трубки – 13 мм.

В водонагревателе можно разместить три или шесть ТЭНов, равномерно распределив их по фазам, тогда мощность одного нагревателя должна быть 4 или 2 кВт.

В прил. П.1.1: «ТЭНЫ для нагрева воды», выбираем ближайшие подходящие нагреватели (табл. 2.6).

Таблица 2.6.

Параметры ТЭНов для водонагревателя (рис. 2.6)

Марка	Мощность, кВт	Размеры, мм					Активная длина, мм
		D_{mp}	A	Γ	D	$R_{изг.}$	
ТЭН-100А13/4.00P220	4,0	13	484	80	464	34	900
ТЭН-85А13/2.0P220	2,0	13	411	73	391	30	750

Удельная поверхностная мощность ТЭНов (2.5)

$$\varphi_{н4} = 4000 / (3,14 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 900 \cdot 10^{-3}) = 10,8 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2,$$

$$\varphi_{н2} = 2000 / (3,14 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 750 \cdot 10^{-3}) = 6,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Удельная мощность, допустимая для нагрева неподвижной воды, согласно условному обозначению среды (буква Р): $\varphi_e = 15 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ (табл. 2.5). Условие (2.4) соблюдено, оба ТЭНа можно использовать в водонагревателе. Однако, исходя из возможности регулирования мощности водонагревателя путем переключения схемы соединения ТЭНов и меньшего снижения мощности при повреждении одного из них, принимаем ТЭН-85А13/2,0 P220 мощностью 2 кВт.

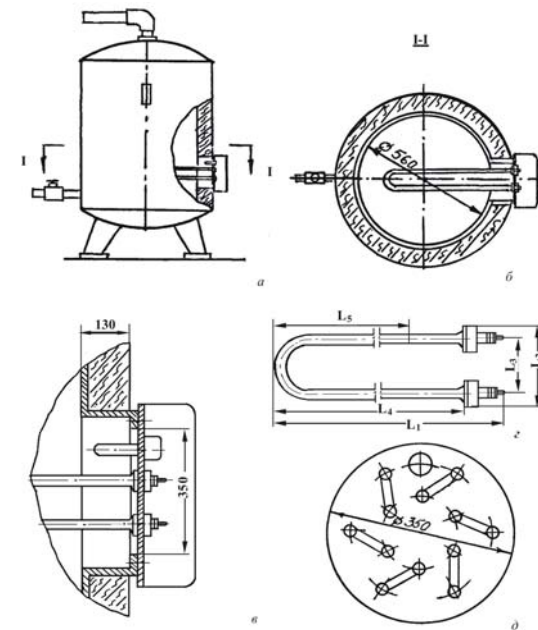


Рис. 2.6. Аккумуляционный водонагреватель (к выбору ТЭНов): а, б – общий вид и разрез; в – схема устройства нагревательного блока; г – размерные параметры ТЭНов; д – размеры места крепления ТЭНов и способ их размещения

Пример 2.2. Для подогрева неподвижного воздуха определить возможность использования трубчатого нагревателя мощностью 1250 Вт, диаметр трубки из нержавеющей стали – 13 мм, активная длина – 600 мм.

Удельная поверхностная мощность ТЭНа (2,5)

$$\varphi_n = 1250 / (3,14 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 10^{-3}) = 5,1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Удельная допустимая мощность при нагреве неподвижного воздуха ТЭНом с оболочкой из нержавеющей стали (табл. 2.5, среда Т) $\varphi_c = 5,0 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$.

Проверяемый ТЭН не удовлетворяет условию (2.4) и не может использоваться для нагрева неподвижного воздуха.

2.3. Определение температуры поверхности нагревателя

Температуры поверхности нагревателя, °С,

$$t_n = t_c + \varphi_n / \alpha \quad \text{или} \quad t_n = t_c + \Delta t, \quad (2.6)$$

где t_c – температура нагреваемой среды, °С;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к среде, Вт/(м² · °С);

$\Delta t = t_n - t_c$ – разность температур поверхности оболочки нагревателя и среды, °С.

Наибольшую трудность при расчете t_n составляет определение коэффициента теплоотдачи α , который зависит от физических свойств среды, характера ее движения, размеров и взаимного расположения нагревателей. Кроме того, α зависит от самих величин t_n и t_c .

Накопленный опыт эксплуатации ТЭНов показал, что иногда достаточно находить лишь приближенное значение температуры оболочки в соответствии со следующими рекомендациями [10]:

– температура поверхности нагревателя, погруженного в воду или иную легкоподвижную жидкость, превышает температуру среды на 5–15 °С;

– коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воде при естественной конвекции составляет: при температуре воды 10–15 °С – 750–800, а при 90–100 °С – 3500–4000 Вт/(м² · °С);

– температура поверхности нагревателя, погруженного в расплавленный металл или залитого в металлическое изделие, примерно равна температуре металла;

– температура поверхности нагревателя при нагреве воздуха, газов, масел и жиров значительно отличается от температуры среды, и в этом случае ее необходимо рассчитывать.

При свободной конвекции значения коэффициентов теплоотдачи не велики и их зависимость от температуры слабая. При разности температур между нагретой плоской поверхностью и окружающим воздухом от 15 до 150 °С для вертикальной и горизонтальной поверхности, обращенной вверх, $\alpha = 5–10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$. Большие цифры относятся к более высоким значениям теплоперепада. Для горизонтальной поверхности, обращенной вниз, α ниже указанных величин почти в 2 раза.

При вынужденном движении жидкости или газа интенсивность теплоотдачи зависит в основном от схемы обтекания нагревателей, их формы и размеров, скорости потока. При прочих равных условиях, чем выше скорость течения среды, тем больше коэффициент теплоотдачи, но одновременно растет гидравлическое сопротивление потоку. При малых скоростях движение среды имеет струйный характер – ламинарный режим, а при больших – вихревой (турбулентный). Переход из ламинарного режима в турбулентный зависит от скорости течения U и кинематической вязкости γ среды, эквивалентного диаметра d и определяется безразмерным соотношением этих величин, которое называют числом Рейнольдса:

$$R_e = vd/\gamma. \quad (2.7)$$

Средняя скорость потока, м/с,

$$v = m_\tau / \rho S, \quad (2.8)$$

где m_τ – расход среды, кг/с;

ρ – плотность среды, кг/м³;

S – площадь поперечного сечения канала, м².

Эквивалентный диаметр канала

$$d = 4S/P, \quad (2.9)$$

где P – периметр канала, м.

Для круглых труб, стержней, проволок эквивалентный диаметр равен их наружному.

Кроме того коэффициент теплоотдачи зависит от удельной теплоемкости c , теплопроводности λ , температуропроводности a , динамической вязкости μ , и кинематической вязкости ν среды, а так же критерия Прандтля.

$$Pr = \nu/a. \quad (2.10)$$

В случае поперечного обдува одиночного или редко расположенных ТЭНов коэффициент теплоотдачи α можно определить по прил. 5 и 6 [10].

Наиболее характерные случаи теплообмена и формулы для расчета коэффициентов теплоотдачи от поверхности ТЭНов к газам заимствованы из [3] и даны в прил. 6.

Температуру поверхности горизонтально и вертикально расположенных ТЭНов в масляных средах большого объема можно определить по номограммам прил. 7 и 8 [10]. Номограммы построены для случая нагрева масла марки МК при отсутствии его принудительного движения и при диаметре оболочки ТЭНа 13 мм. При нагреве других марок масел и ином диаметре оболочки значение коэффициента теплоотдачи находят через коэффициент теплоотдачи для ТЭНа диаметром 13 мм, работающего в масле МК, по формуле

$$\alpha = \alpha_{\text{МК}} + \Delta \alpha, \quad (2.11)$$

где $\Delta \alpha$ – поправка, зависящая от вида нагреваемого масла, его температуры и диаметра оболочки. Поправку $\Delta \alpha$ находят по номограмме прил. 9.

Приложение 9, б отличается от рисунка прил. 9, а тем, что определяющим размером является не диаметр оболочки, а высота вертикального участка активной части нагревателя Н, погру-

женного в масло. Поэтому на номограмме вместо линий $d_{\text{тр}}$ нанесены линии Н.

Схемы пользования номограммами проиллюстрируем на примерах [10].

Пример 2.3. Определить температуру оболочки одиночного ТЭНа при его поперечном обдуве воздухом. Мощность нагревателя $P_1 = 1500$ Вт, длина активной части $L_a = 1,0$ м, диаметр трубки $d_{\text{тр}} = 13 \cdot 10^{-3}$ м. Температура воздуха (среды) $t_c = 200$ °С. Скорость движения $\nu = 6$ м/с.

Удельная поверхностная мощность нагревателя (2.5)

$$\varphi_{\text{н}} = 1500 / 3,14 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \approx 3,7 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

По номограмме прил. 5 при $t_c = 200$ °С, $\nu = 6$ м/с, $d_{\text{тр}} = 13 \cdot 10^{-3}$. Находим $\alpha \approx 75$ Вт/(м² · °С).

Далее на номограмме приложения 6 находим точки А и В, расстояние между которыми равно 75 Вт/(м² · °С) в масштабе этой номограммы. Точка А должна лежать на линии температуры среды, в данном примере $t_c = 200$ °С, а точка В должна быть на линии $\varphi_{\text{н}}$ ($\varphi_{\text{н}} \approx 3,7$ Вт/м²). Проекция точки А на ось ординат показывает значение $\Delta t \approx 305$ °С.

По (2.4) $t_{\text{н}} = 200 + 305 = 505$ °С.

Пример 2.4. Определить температуру оболочки горизонтально расположенного ТЭНа в трансформаторном масле.

Мощность ТЭНа – 250 Вт, длина активной части – 0,5 м, диаметр трубки – $8 \cdot 10^{-3}$ м, температура масла – $t_c = 92$ °С.

По номограмме прил. 9, а для трансформаторного масла при $t_c = 92$ °С и для $d_{\text{тр}} = 8 \cdot 10^{-3}$ м, находим $\Delta \alpha = 70$ Вт/(м² · °С). Маршрут движения показан стрелками.

Удельная мощность на поверхности ТЭНа (2.5)

$$\varphi_{\text{н}} = 250 / 3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \approx 1,99 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

По номограмме прил. 7 для $t_c = 92 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_n = 1,99 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ и для $\Delta\alpha \approx 70 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$. Определяем $\Delta t = 81 \text{ }^\circ\text{C}$. Здесь отрезок AB на рисунке прил. 7 в масштабе равен $70 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$. Точка A соответствует пересечению AB с линией $t_c = 92 \text{ }^\circ\text{C}$, а точка B лежит на линии $\varphi_n = 1,99 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$.

Температура оболочки ТЭНа (2.4)

$$t_n = 92 + 81 = 173 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Пример 2.5. Определить температуру оболочки вертикально расположенного ТЭНа в подсолнечном масле. Удельная мощность на поверхности нагревателя $\varphi_n = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$, $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$, $H = 0,45 \text{ м}$.

По номограмме прил. 9 для подсолнечного масла при $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ и $H = 0,45 \text{ м}$ находим $\Delta\alpha = 88 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$.

По номограмме прил. 8 для $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_n = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$, и $\Delta\alpha = 88 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$ определяем $\Delta t = 64 \text{ }^\circ\text{C}$. На рис. прил. 8 отрезок AB равен в масштабе $88 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$.

Согласно (2.4) $t_n = 120 + 64 = 184 \text{ }^\circ\text{C}$.

Пример 2.6. Определить температуру поверхности трубчатых нагревателей электрокалориферной установки СФОЦ-25/0,5И2. Расположение ТЭНов соответствует показанному в строке 7 прил. 10. Температура воздуха на входе калорифера $t_1 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ и выходе $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ его скорость 8 м/с . Количество ТЭНов – 15 шт., диаметр трубки – $13 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, шаг оребрения – $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, высота оребрения – $14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, удельная мощность на оребренной поверхности ТЭНа $\varphi_n = 5,3 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$.

Коэффициент теплоотдачи α определим по формулам и графикам прил. 10, строка 7 и др. Физические параметры воздуха примем из прил. 3 при средней температуре $t_{cp} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5(-10 + 40) = 15 \text{ }^\circ\text{C}$: теплопроводность $\lambda = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; кинематическая вязкость $\nu = 15,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; критерий Прандтля $Pr = 0,722$.

Уточняющие коэффициенты найдены по соответствующим графикам в прил. 10, строка 6 и 7: $\epsilon_z = 0,98$, $\epsilon_p \approx 1,1$, т. к. объемная доля водяных паров в воздухе не известна.

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_n \cdot 0,99 \cdot 1,1 = 1,09\alpha_n = 1,09 \cdot 36,88 = 40,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}.$$

$$\alpha_n = 0,213 \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{(7,5 \cdot 10^{-3})^{0,35}} 0,722^{0,35} \left(\frac{13 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,54} \left(\frac{14 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 10^{-3}} \right)^{-0,14} \left(\frac{8}{15,5 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,65} = 36,88 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{}^\circ\text{C)}.$$

Температура поверхности трубчатого нагревателя (2.6)

$$t_n = 0,5(-10 + 40) + \frac{8,5 \cdot 10^3}{40,2} = 226 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2.4. Расчет трубчатых нагревателей

Задача расчета трубчатых нагревателей состоит в определении геометрических размеров спирали (рис. 2.7), при которых температура ее и оболочки ТЭНа не превышают допустимую, мощность соответствует расчетной, а прочность электрической изоляции не ниже нормируемой.

Основными расчетными размерами являются: диаметр и длина проволоки, диаметр, шаг, количество витков, длина спирали и некоторые другие.

Расчет основан на исходных данных, важнейшие из которых следующие:

1. Мощность трубчатого нагревателя P .
2. Напряжение питания U .
3. Развернутая длина нагревателя L .
4. Длина контактных стержней в заделке L_k .
5. Материал оболочки, спирали и наполнителя.
6. Наружный диаметр оболочки $d_{тн}$.
7. Толщина стенки оболочки δ .
8. Температура оболочки t_n и спирали $t_{нз}$.

Некоторые рекомендации по выбору 1–4 даны в подразделе 2.2., более подробные – в [10].

Материал оболочки ТЭНа зависит от вида среды, характера и температуры нагрева (табл. 2.5). Максимально допустимая температура для основных материалов оболочки ТЭНов, эксплуатируемых в воздухе, составляет, °С: медь, латунь – 250; алюминиевый сплав – 350; сталь углеродистая – 450; сталь нержавеющая – 750. Трубы из цветных металлов обладают высокой теплопроводностью, однако используют их достаточно редко, наибольшее применение находят стальные цельнотянутые и сварные.

Наружный диаметр труб, используемых для оболочки, лежит в диапазоне 8–20 мм. После обжатия ТЭНа, в процессе его изготовления, диаметр трубы уменьшается на 20–25 %. Толщину стенки оболочки принимают согласно рекомендациям [10]:

диаметр оболочки, мм – 6...8, 8...10, > 10;
толщина стенки оболочки, мм – 0,6; 0,8; 1,0.

В качестве наполнителя чаще всего используют периклаз MgO – плавненный оксид магния, обладающий хорошими изоляционными свойствами и достаточной теплопроводностью. Характеристики периклаза зависят от количества примесей в нем и температуры. По качеству периклаза делят на четыре класса (высший, I, II, III). Удельное сопротивление периклаза при 800 °С уменьшается в зависимости от класса от $5 \cdot 10^{-6}$ до $0,2 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, а при 1000 °С – от $2,5 \cdot 10^{-6}$ до $0,2 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. Теплопроводность зависит от плотности и температуры периклаза. При изменении плотности от 3200 до 2150 кг/м³ и температуре 800 °С теплопроводность снижается с 2,3 до 1,0 Вт/(м · °С). Поэтому тепло- и электрофизические характеристики периклаза определяют на предприятии перед расчетом и изготовлением ТЭНа.

Материалом проволоки для изготовления спирали может быть никельхромовый или железохромоникелевый сплав. Диаметр проволоки, используемый в ТЭНах наиболее часто, составляет 0,1–1,6 мм. Предпочтение отдается никельхромовым сплавам.

Температуру спирали для большинства серийно выпускаемых ТЭНов общего и бытового назначения следует принимать на 20–25 % ниже максимальной рабочей, указанной в табл. 1.1–1.4, которая зависит не только от материала, но и от диаметра проволоки.

ТЭНа могут быть рассчитаны различными методами, в том числе и методом удельной мощности, изложенным в подразделе 1.5.

В этом случае диаметр проволоки спирали d находят путем аналитического или графического решения уравнения (1.28). Применительно к нагревательному элементу из проволоки

$$\varphi_1 = \frac{4\rho_t P_1^2}{\pi^2 U^2 d^3}, \quad (2.12)$$

$$\varphi_2 = \frac{t_{нз} - t_{н}}{r_t}. \quad (2.13)$$

Термическое сопротивление теплопередачи от спирали к поверхности оболочки ТЭНа, $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$,

$$r_t = r_{тн} + r_{тт}, \quad (2.14)$$

где $r_{тн}$, $r_{тт}$ – термическое сопротивление теплопередачи наполнителя (изоляции) и стенки трубки соответственно, $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$.

Термическое сопротивление наполнителя, $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$, [11]

$$r_{тн} = \frac{d_{нз}}{2\lambda_{н}} \left[\ln \frac{d_{тв}}{d_c} + 10^{-3} \left(0,5 + 59 \frac{d}{d_c} \right) \left(\frac{h}{d} - 1 - 6,56 \left(\frac{d}{d_{тв}} \right)^{0,38} \right) \right], \quad (2.15)$$

где $d_{нз} = \sqrt{d_c d_{тв}}$ – эквивалентный диаметр наполнителя (рис.2.7), м;

Термическое сопротивление трубки, $m^2 \cdot ^\circ C/Вт$,

$$r_{тт} = \frac{d_{тв}}{2\lambda_t} \ln \frac{d_{тн}}{d_{тв}}, \quad (2.16)$$

где $d_{тв} = \sqrt{d_{тн} d_{тв}}$ – эквивалентный диаметр трубки, м.

Условие (1.28) находят подстановкой в (2.10) и в (2.11) входящих в них величин и значений d , принятых произвольно в диапазоне 0,1–1,6 мм. Значение d , при котором $\varphi_1 = \varphi_2$, принимают для дальнейших расчетов размеров спирали, округлив его до ближайшего диаметра проволоки d_n , выпускаемой предприятиями.

Длину проволоки спирали вычисляют по (1.25). Значение φ в этой формуле рассчитывают по (2.10), подставив в нее $d = d_n$.

Из [10] известно и практикой подтверждено, что в процессе изготовления ТЭНа сопротивление спирали изменяется. При опрессовке ТЭНа проволока деформируется, и ее сопротивление снижается на 20–24 %. Кроме того, в процессе работы материал проволоки подвергается отжигу, который повышает электрическое сопротивление никельхромовых сплавов на 3–5 % и понижает его примерно на 4 % для железохромоалюминиевых сплавов. Эти изменения следует учесть путем увеличения длины проволоки, рассчитанной по (1.25), примерно на 26 % для никельхромовых сплавов и на 18 % для железохромоалюминиевых.

Спираль должна обладать определенной жесткостью и не провисать по оси при ее монтаже в трубчатой оболочке. Излишне малый диаметр спирали может провоцировать повреждение проволоки при ее навивке. Поэтому принимают $d_c = (6–10)d$ (2.17).

Диаметр спирали после навивки и снятия с оправки увеличивается на 5–7 %, а в результате последующей опрессовки ТЭНа уменьшается приблизительно на 16 %. Согласно рекомендациям [10] расстояние между спиралью и внутренней стенкой трубки должно быть не менее 1,0 мм по условиям электроизоляции спирали от оболочки. Шаг спирали, количество витков и длину спирали рассчитывают по (1.45)–(1.47).

Сопротивление изоляции ТЭНа в рабочем режиме должно быть не менее $1,5 \cdot 10^6$ Ом/м. Если рассматривать спираль как цилиндр, установленный соосно оболочке, то сопротивление такой коаксиальной системы при температуре t

$$R_{ин} = \frac{\rho_{ин}}{2\pi(L_c/h + 2L_k)} \ln \frac{d_{тв}}{d_{сн}}, \quad (2.17)$$

где $\rho_{ин}$ – удельное сопротивление материала изоляции при температуре t , Ом · м;

L_c – длина спирали;

h – шаг спирали; L_k – длина контактной части в заделке, м;

$d_{тв}$ – диаметр внутренней оболочки, м,

$d_{сн} = d_c + d$ – диаметр наружной спирали, м.

Сопротивление изоляции одного метра трубчатого нагревателя

$$R_{ин} = R_{ин}/L, \quad (2.18)$$

где L – длина трубчатого нагревателя, м.

Параметры, рассчитанные по приведенным формулам, будут отличаться от реальных, измеренных после изготовления ТЭНа, так как трудно учесть всевозможные отклонения в характеристиках материалов и размеров элементов, образующих собой трубчатый нагреватель.

Пример 2.7. Рассчитать трубчатый электрический нагреватель со следующими основными параметрами (рис. 2.1): мощность $P_I = 2000$ Вт; напряжение питания $U = 220$ В; развернутая длина не более $L = 0,8$ м; длина контактного стержня в заделке $L_k = 0,04$ м; диаметр трубки $d_t = 13 \cdot 10^{-3}$ м; толщина стенки трубки $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$ м; температура поверхности трубки $t_n = 400$ °С; температура спирали допустимая $t_{нэд} \leq 850$ °С; допустимое линейное сопротивление изоляции $R_{инд} \geq 1,5 \cdot 10^6$ Ом/м.

Принимаем: материал трубки – сталь углеродистая Ст.10, теплопроводность $\lambda_t = 15$ Вт/(м · °С); материал наполнителя – периклаз, плотность 2800 кг/м³, теплопроводность при 800 °С $\lambda_u = 15$ Вт/(м · °С), удельное электрическое сопротивление при 800 °С $\rho_n = 2,6 \cdot 10^6$ Ом · м; материал спирали – нихром Х20Н80-Н, удельное сопротивление при 20 °С $\rho_t = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом · м.

Расчетная схема ТЭНа показана на рис. 2.7.

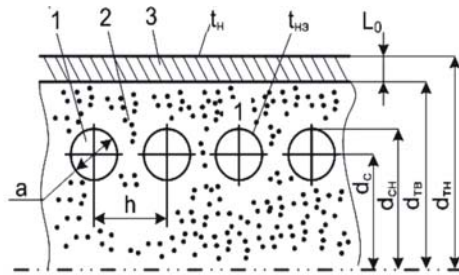


Рис. 2.7. Расчетная схема трубчатого электрического нагревателя:
 1 – нагревательный элемент (спираль); 2 – наполнитель; 3 – защитная оболочка;
 $t_{нз}$ – температура спирали; t_n – температура нагревателя (оболочки)

1. Примем значения диаметра проволоки d в наиболее часто используемом диапазоне (0,1–1,6 мм), например, 0,2; 0,4; 0,6.
 2. Определим диаметр спирали по (1.43), приняв $d_c = 10d$.
 3. Примем внутренний диаметр трубки, учитывая, что расстояние между витками спирали и внутренней стенкой трубки должно быть не менее 1,0 мм.
 4. Наружный диаметр трубки примем на 2 мм больше внутреннего, согласно принятой в задании толщине стенки 1 мм.
 5. Рассчитаем термическое сопротивление теплопередачи от спирали к наружной поверхности трубки по формулам (2.12), (2.13), (2.14). Примем шаг спирали $h = 3d$ или $h/d = 3$.
 6. Примем температуру спирали $t_{нз} = 800$ °С. При этой температуре сопротивление нихрома Х20Н80-Н (табл. 1.1, 1.2)
 $\rho_{800} = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,015 = 1,116 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.
 7. Определим удельные поверхностные мощности – выделяющуюся в спирали φ_1 (2.10) и отдаваемую с оболочки ТЭНа φ_2 (2.11).
- Результаты расчетов по п.п. 1–6 сведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7.

Результаты расчетов к примеру 2.7.

d	d_c	$d_{гв}$	$d_{гн}$	$r_{тн}$	$r_{гт}$	$r_{г}$	φ_1	φ_2
$\times 10^{-3}$ м			$\times 10^{-3}$ м ² ·°С/Вт			$\times 10^3$ Вт/м ²		
0,2	2,0	4,0	6,0	0,65	0,066	0,716	4819,5	558,7
0,4	4,0	8,0	10,0	1,30	0,066	1,366	601,6	292,8
0,6	6,0	10,0	12,0	1,32	0,066	1,386	178,5	288,6
и т. д.								

8. По результатам табл. 2.7 строим графическую зависимость $\varphi(d)$ (рис. 2.8). Точка А соответствует условию $\varphi_1 = \varphi_2$. Это условие выполняется если диаметр проволоки $d = d_p = 0,53 \cdot 10^{-3}$ м. Для дальнейших расчетов принимаем ближайший производимый диаметр $d_n = 0,52 \cdot 10^{-3}$ мм. Этому диаметру соответствует $\varphi_1 = 263,9 \cdot 10^3$ Вт/м².

9. Расчетная длина проволоки спирали (1.25)

$$l_p = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^3 \cdot 220^2}{4 \cdot 1,116 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 (263,9 \cdot 10^3)^2}} = 4,63 \text{ м.}$$

Принимая во внимание снижение сопротивления нихрома в процессе обжарки ТЭНа, увеличим длину проволоки на 26 %. Окончательно длина проволоки

$$l = 4,63 \cdot 1,26 = 5,83 \text{ м.}$$

10. Расчетный диаметр спирали (2.17)

$$d_c = 10d = 10 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Примем диаметр оправки, на которую навивают спираль, $d_{опр} = 4 \cdot 10^{-3}$ м. После навивки и снятия спирали с оправки ее диаметр увеличится на 5–7 %.

Диаметр спирали после навивки

$$d_c = 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,06 = 5,51 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

11. Примем шаг спирали $h = 3d = 1,56 \cdot 10^{-3}$ м. Окончательно $h = 1,5$ мм.

12. Количество витков (1.46)

$$n = \frac{5830}{\sqrt{(3,14 \cdot 5,51)^2 + 1,15^2}} = 336 \text{ витков.}$$

13. Длина спирали (1.48)

$$L_c = 1,5 \cdot 336 = 504 \text{ мм.}$$

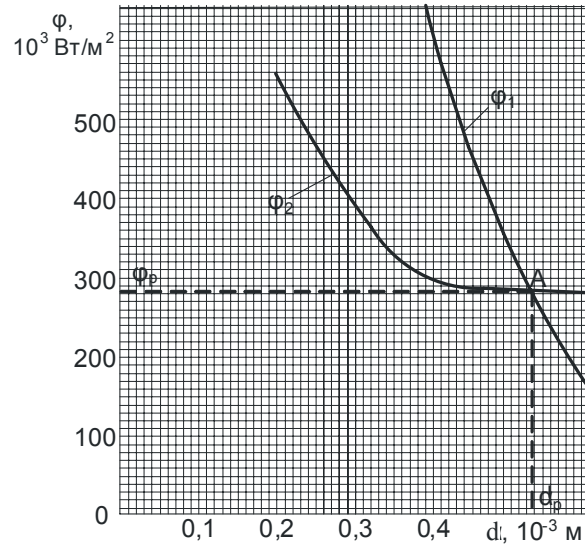


Рисунок 2.8. Зависимость поверхностной мощности от диаметра проволоки нагревательного элемента (к примеру 2.7)

14. Сопротивление спирали в исходном состоянии

$$R_{20} = \frac{\rho_{20} l}{S} = \frac{4 \rho_{20} l}{4 \pi d^2} = \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 5,83}{3,14 \cdot (0,52 \cdot 10^{-3})^2} = 30,2 \text{ Ом.}$$

Сопротивление спирали после изготовления ТЭНа при рабочей температуре

$$R_{800} = \frac{\rho_{200} l}{1,26 S} = \frac{4 \cdot 1,116 \cdot 10^{-3} \cdot 5,83}{1,26 \cdot 3,14 (0,53 \cdot 10^{-3})^2} = 24,3 \text{ Ом.}$$

16. Проверим правильность расчета. Расчетная мощность трубчатого нагревателя

$$P_1 = \frac{U^2}{R_{800}} = \frac{220^2}{24,3} = 1,99 \cdot 10^3 \text{ Вт,}$$

отличается от заданной на 0,5%, что вполне приемлемо.

17. Сопротивление изоляции между спиралью и оболочкой ТЭНа (2.18) при 800 °С и $d_{тв} = 11 \cdot 10^{-3}$ м:

$$R_{и1} = \frac{2,6 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 (0,504/3 + 2 \cdot 0,04)} \ln \frac{11 \cdot 10^3}{(5,51 + 0,52) 10^{-3}} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

Сопротивление изоляции одного метра ТЭНа (2.18) $R_{и1} = 1,0 \cdot 10^6 / (0,504 + 2 \cdot 0,04) = 1,71 \cdot 10^6$ Ом/м, больше минимальной допустимой величины.

18. Удельная поверхностная мощность: на оболочке нагревателя (табл. 2.5)

$$\varphi_{об} = \frac{1990}{3,14 \cdot 0,013 \cdot 0,584} = 83,9 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2 ;$$

на нагревательном элементе (возможно до $600 \cdot 10^3$ Вт/м²)

$$\varphi_{н} = \frac{1990}{3,14 \cdot 0,52 \cdot 10^{-3} \cdot 4,63} = 263 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Расчетные геометрические размеры нагревательного элемента обеспечивают заданную мощность и электрическое сопротивление изоляции ТЭНа, при этом удельная поверхностная мощность лежит в допустимом диапазоне.

3. ПРОТЯЖЕННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

3.1. Устройство и характеристики нагревательных проводов и кабелей

Электрические протяженные нагреватели включают в себя нагревательные провода, кабели и ленты. Их используют для создания необходимой температуры на поверхностях с большой площадью. Удельная поверхностная мощность протяженных нагревательных устройств составляет от 5 до 500 Вт/м², температура обогреваемой поверхности в большинстве случаев менее 100 °С, хотя в некоторых технологических процессах она может быть до 200 и даже до 800 °С.

Нагревательные провода и кабели классифицируют:

- по конструктивному исполнению нагревательного элемента – жилы (проволочные, спиральные, зональные, саморегулирующиеся);
- количеству жил (одно- и многожильные);
- конструктивному исполнению оболочки (обычные, армированные, бронированные);
- рабочей температуре (низкотемпературные – до 100 °С, среднетемпературные – до 250 °С, высокотемпературные – до 1000 °С).

Проволочный нагревательный элемент выполняют из проволоки стальной оцинкованной, латунной, медной, сплава высокого сопротивления.

Спиральный нагревательный элемент представляет собой проволоку из сплава высокого сопротивления, навитую в виде спирали на гибкий термостойкий сердечник из кварцевых нитей или из другого материала.

Зональный нагревательный элемент выполняют в виде спирали из проволоки, навитой на две изолированные медные жилы, к которым подключают напряжение питания (рис. 3.1, а). Через определенное расстояние спираль электрически соединена с жилами, т. е. участки спирали подключены параллельно к жилам, подводящим напряжение.

Саморегулирующийся нагревательный элемент представляет собой две медные токоподводящие жилы, пространство между которыми заполнено полупроводящей пластмассой (рисунок 3.1, б). Сопротивление пластмассы сильно зависит от температуры. При ее увеличении сопротивление возрастает, мощность тепловыделения снижается, и наоборот.

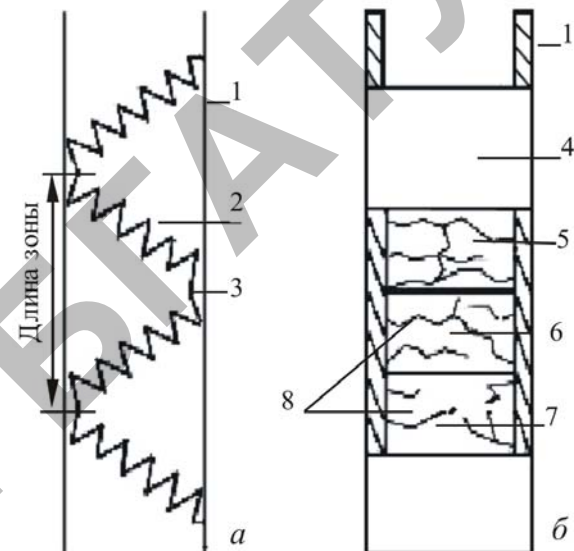


Рис. 3.1. Принцип устройства зонального (а)

и саморегулирующегося (б) протяженного нагревателя:

- 1 – токоподводящие провода; 2 – нагревательная жила; 3 – контакт между жилой и проводом; 4 – саморегулирующаяся полупроводящая матрица; 5, 6, 7 – холодный, теплый, горячий участки; 8 – токопроводящие мостики

Конструктивное исполнение оболочки (рис. 3.2) зависит от области преимущественного использования нагревателя и рабочей температуры. Из ряда протяженных нагревателей несколько выделяется нагревательная лента типа Лонглайн («длинная линия»), предназначенная для обогрева длинных трубопроводов, например, до 5 км при питании из одной точки. Нагревательный элемент, сделанный из медной ленты, может быть одно- или трехжильным, рассчитан на напряжение питания до 1000 В.

Низкотемпературные нагреватели (до 100 °С) применяют для обогрева почвы в теплицах, полов в животноводческих и бытовых помещениях, площадок, крыш, трубопроводов и др. Это – проволочные, зональные и саморегулирующиеся кабели.

Среднетемпературные нагреватели (до 250 °С) используют в основном для обогрева трубопроводов, резервуаров. Наиболее употребляемые – проволочные и саморегулирующиеся кабели.

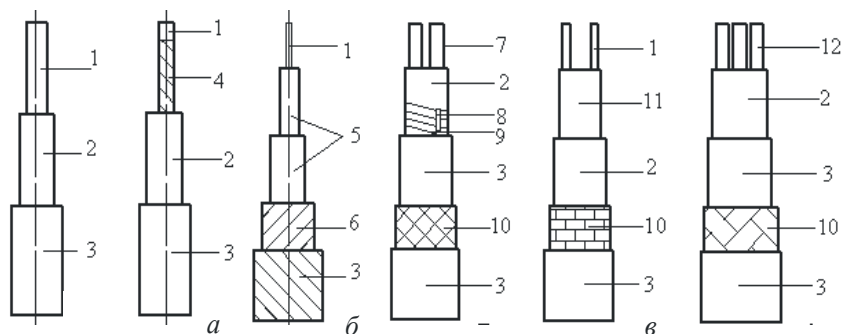


Рис. 3.2. Нагревательные провода (а), кабели (б), ленты (в):

1 – нагревательная жила; 2 – изоляция; 3 – оплетка; 4 – сердечник; 5 – двуслойная изоляция; 6 – броня; 7 – токоподводящие провода; 8 – контакт соединения жилы и проводов; 9 – полупроводниковая нагревательная масса; 10 – металлическая оплетка; 11 – плоская нагревательная лента

Высокотемпературные нагреватели (до 1000 °С) применяют для обогрева технологического оборудования. Используют проволочные и зональные кабели.

Условное обозначение нагревательных проводов и кабелей не систематизировано. На мировом рынке ряд производителей выпускает протяженные нагреватели, конструктивно мало отличающиеся друг от друга. Некоторое отличие есть в технических и экономических показателях. В качестве примера приведем технические характеристики протяженных нагревателей, используемых предприятием ООО «Специальные Системы и Технологии» (табл. 3.1). Подробные характеристики нагревателей даны в прил. 11 [12].

Основные характеристики нагревательных кабелей

Марка	Тип конструкции	Исполнение					max, длина секции, м	Рабочее напряжение, В			Тепловыделение, Вт/м	Температура, °С		
		Осн.	...С, ...Х, ...N,	...СТ, ...ХТ, ...Т,	...CF, ...XF, ...NF,	...CS,		220-240	380	В		max, рабочая	max, без нагр.	min. монтажа
<i>Низкотемпературные</i>														
НО	Р			(х)			125*	х	0		15–20	100	100	-10
БНО	Р			(х)			100	х	0		15–25	100	100	-10
НБ	РБ		(х)				550*	х	х		20–40	130	130	-20
БНБ	РБ		(х)				258	х	х		20–40	130	130	-20
FSM	С	х		х			128	х			12–17	65	85	-30
FSLe	С	х	х	х			180	х			11–23	65	85	-30
GTe	С			(х)	х		90	х			18–39	65	85	-30
FSR	С	х	х	х	х		198	х			10–35	65	85	-30
HW-R	С	х		х			135	х			9,5	100	85	-10
HW-P	С	х		х	х		110	х			13	100	85	-10
SM-A	С			(х)			80	х			28	65	85	0
SM-B	С			(х)			50	х			81	100	105	0

Окончание табл. 3.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Среднетемпературные</i>														
FSS	С	х	х		х		162	х			15–55	120	200	-30
FSP	С	х	х		х		154	х			17–50	110	135	-30
EMTS	З	х	х		х	х	164	х			6,5–50	190	200	-80
EMTF	З	х	х		х		164	х			6,5–70	190	200	-80
MTFJ	З	х	х		х		212	х			6,5–50	190	200	-40
MTSS	З	х	х		х	х	198	х			6,5–66	190	200	-80
HTS1F	РЛ	х	х		х	х	5000			х	10–60	218	230	-40
HTS3F	РЛ	х	х		х	х	2000			х	10–60	218	230	-40
CHO	Р	х	(х)0		(х)0		65	х	0		24–40	200	200	-10
KCC	скин	х					200			х	10–40	200	200	-40
<i>Высокотемпературные</i>														
PHT	З	х	х		х		152	х			10–70	275	285	-40
AHT	З	х					144	х			10–150	340	350	-40
BHO	Р	х					19,3	х	0		86–370	1000	1000	-40
BHC	РС	х					0,5–4,1	х	0		170–470	1000	1000	-40

Примечания:

- для кабелей HW приведено тепловыделение при +65 °С, для остальных – при 0 °С;
- указанные длины нагревательных секций могут состоять из отрезков кабеля, соединенных последовательно с помощью муфт;
- все саморегулирующиеся и зональные кабели выпускают на рабочее напряжение 110,120 В;
- кабели могут быть изготовлены по заказу на любое номинальное напряжение, ограниченное пробивной прочностью изоляции;
- в обозначениях исполнения С означает оплетку из медных проволок, N – из никелированных, Х – какой-либо из этих вариантов, Т – оболочку из термопластика, F – из фторполимера, S – из кремниевой резины, В – высокое напряжение (до нескольких кВ), зависящее от длины нагревательной секции, (х) – базовая конструкция кабеля близка к данному типу исполнения, О – по заказу, Р – проволочные кабели, РБ – проволочные бронированные, РЛ – проволочные типа Лонглайн, РС – проволочные спиральные, С – саморегулирующиеся, З – зональные.

3.2. Электрообогрев бетонных полов

Электрообогреваемые полы в производственных, общественных и жилых помещениях создают оптимальный температурный комфорт, экономят электроэнергию, повышают эффективность использования пространства, долговечны.

При общем отоплении неравномерность температуры на полу и на высоте 1,5–2,0 м может достигать от нескольких до 10 градусов и выше. Кроме того, теплый воздух от отопительных приборов, расположенных на стенах, поднимается к потолку, затем остывает и опускается вниз, в результате на уровне пола образуется сквозняк.

Благодаря повышению температуры пола можно снизить на 1–2 °С среднюю температуру помещения и в результате уменьшить потребление энергии на 10–20 %, не ухудшая тепловой комфорт. Кроме того, молодняк сельскохозяйственных животных не скучивается и не ложится друг на друга, как это бывает при инфракрасном обогреве, и это повышает их сохранность на 2–3 % и прирост живой массы на 3–4 % [13, 14].

Устройства электрообогрева пола невидимы, пожаробезопасны, устраняют проблемы, связанные с использованием напольных, настенных и подвесных нагревательных приборов, занимающих пространство, собирающих на своей поверхности пыль, мешающих размещению оборудования технологического и бытового назначения. Нагревательные кабели могут прослужить столько же, сколько и помещение, в котором они установлены, не требуя обслуживания.

Электрообогреваемый пол можно использовать как дополнительную (комфортную) и как основную (даже с аккумуляцией теплоты) системы отопления. В первом случае установленная мощность составляет до 150 Вт/м², во втором – не должна превышать 200 Вт/м². В противном случае аккумуляторная система должна быть дополнена другим отопительным оборудованием, например электроконвекторами.

Рекомендуемая мощность в области края пола 200–250 Вт/м². Обычно ширина краевой зоны составляет 0,5–1,5 м. Устройство электрообогреваемого бетонного пола мало различается в зависимости от его назначения и вида помещения (рис. 3.3). Нагревательный кабель укладывают в нижней части бетонной стяжки. Толщина стяжки для теплых полов составляет 40–50 мм, для аккумулярую-

щих – более 70 мм, краевой зоны до 30 мм. В отдельных случаях в жилых помещениях толщина стяжки может составлять не более 20 мм. Гидроизоляция является необходимым элементом пола в сырых помещениях, особенно в животноводческих. Теплоизоляция не увеличивает значительно затраты, но экономит 10–30 % электроэнергии. Чаще всего для теплоизоляции используют твердые сорта пенополистирола, пенопласта или минеральной ваты в виде плит толщиной 30 мм и более. Теплопроводность этих материалов не превышает 0,04 Вт/(м · °С).

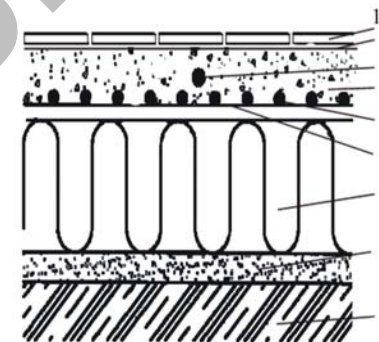


Рис. 3.3. Устройство электрообогреваемого бетонного пола на грунте во влажном помещении:

- 1 – покрытие; 2 – гидроизоляция; 3 – термопреобразователь регулятора температуры; 4 – стяжка; 5 – нагревательный кабель; 6 – монтажная лента; 7 – теплоизоляция; 8 – песчаное основание; 9 – грунт

Электротехническая часть обогреваемого пола включает одну или несколько нагревательных секций, терморегулятор, монтажную ленту, трубку для защиты термопреобразователя, если его устанавливают в полу (рис. 3.4). Нагревательная секция – это отрезок нагревательного кабеля фиксированной длины, рассчитанной на определенную величину напряжения питания. Секции могут быть одно- и двухжильными (рис. 3.5). В одножильной секции нагревательная жила и экранирующая оплетка кабеля подключены в соединительных муфтах к медным проводам, которые в свою очередь подключают к терморегулятору и к сети питания. В двухжильной секции две жилы кабеля и оплетка в соединительной муфте подключе-

ны к медным выводным проводам, а другие концы жил закорочены между собой в концевой муфте (рис. 3.6).

Терморегулятор поддерживает температуру пола или воздуха в помещении согласно заданной программе. Мощность, коммутируемая терморегулятором напрямую, составляет 2–3 кВт, при большей мощности используют дополнительно электромагнитные пускатели. Первичным преобразователем температуры является терморезистор. Терморегуляторы имеют до нескольких недельных программ поддержания температуры в ночное и дневное время, в рабочий и выходной день. Они могут разогреть помещение к заданному времени или совсем выключить отопление в ночное время.



Рис. 3.4. Комплект для электрообогреваемого пола

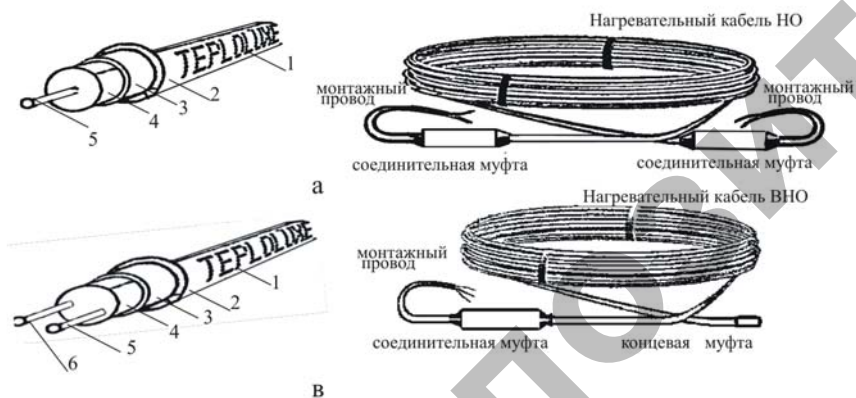


Рис. 3.5. Одножильная (а) и двухжильная (б) нагревательные секции: 1 – маркировка; 2 – оболочка; 3 – оплетка; 4 – двухслойная изоляция; 5, 6 – нагревательная и соединительная жилы

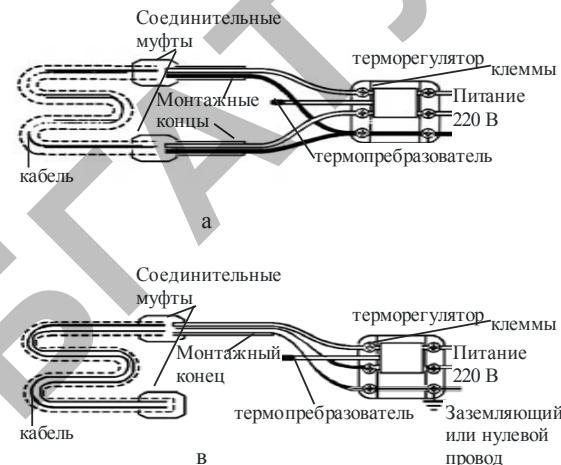


Рис. 3.6. Схема подключения одно (а) и двухжильных (б) кабелей

Монтажная лента предназначена для облегчения раскладки и крепления к полу нагревательных секций. Отрезки ленты крепят к черновому полу, а нагревательный кабель прижимают лепестками к ленте (рис. 3.7). Расстояние между монтажными лентами зависит от назначения и размеров помещения и составляет от 0,25 до 2,0 м.

Монтажные концы нагревательных секций подводят к месту расположения терморегулятора. Соединительную муфту и начальный участок нагревательной секции крепят на полу и с этого места начинают укладывать нагревательный кабель, соблюдая заданное расстояние между его ветвями (шаг укладки), огибая поверхности пола, на которых будет установлено технологическое или иное оборудование. Шаг укладки кабеля на полу может быть различным, например, в зонах содержания взрослых и молодняка животных (рис. 3.8). Обычно он лежит в диапазоне от 50 до 200 мм.



Рис. 3.7. Схема крепления нагревательного кабеля (1) и монтажной ленты (2)

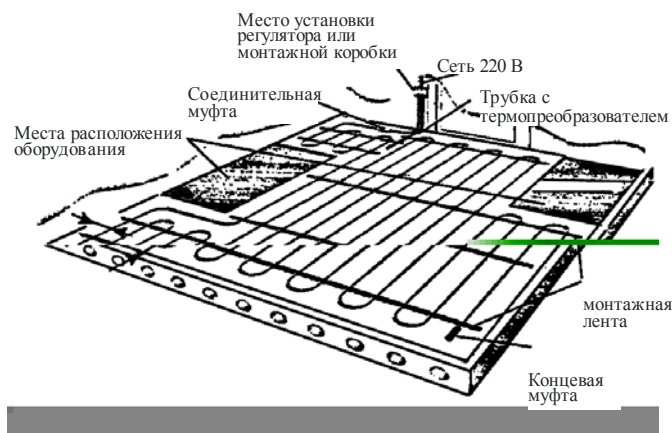


Рис. 3.8. Схема укладки нагревательной секции

Термопреобразователь устанавливают в пластмассовой трубке в полу. Один конец трубки глушат, чтобы исключить попадание в нее раствора, а другой выводят в коробку терморегулятора. Радиус изгиба трубки должен быть не менее 50 мм, чтобы свободно извлекать термопреобразователь в случае его замены (рис. 3.9).

Уложенные на черновой пол нагревательный кабель и трубку термопреобразователя дополнительно фиксируют горками раствора и покрывают сверху цементно-песчаной стяжкой. Для придания стяжке эластичности при температурных расширениях в нее добавляют специальные присадки. Кроме того, стяжка может быть армирована полимерной сеткой. Включают электрообогреваемый пол после полного затвердевания бетона, примерно через 28 дней.

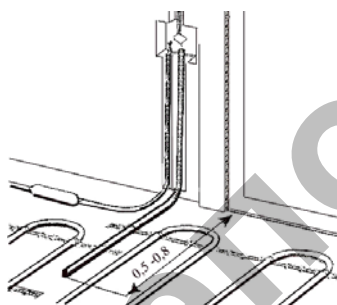


Рис. 3.9. Схема установки термопреобразователя в полу

3.3. Электрообогрев устройств стаивания снега и льда

Автостоянки, дороги, тротуары, наружные ступени, погрузочные рампы, мосты, крыши и водостоки – наиболее распространенные места стаивания снега и льда [14].

При разработке устройств стаивания необходимо учитывать географическое местоположение объекта, его назначение и специфику, требования к устройству, например, скорость таяния снега, возможность отвода талой воды, промерзаемость объекта снизу и сверху и др.

Установленная мощность устройств стаивания, для широт, в которых находится Беларусь, 250–400 Вт/м². Мосты и погрузочные платформы особенно чувствительны к холоду и ветру. Ветер со скоростью 10 м/с дополнительно снижает температуру приблизительно на 5 °С, поэтому мощность для них должна быть увеличена до 50 %, если нет возможности укладывать нагревательный кабель на термоизоляцию.

Нагревательный кабель может быть уложен под асфальт, в бетон, под тротуарную плитку, на крыши, в желоба и водостоки.

Существуют два способа установки нагревателей под асфальт (рис. 3.10): 1. Если стойкость изоляции кабеля менее 200 °С, кабель укладывают в песок, а лучше в бетон толщиной до 20 мм, а потом укладывают асфальт, охладив его до 130–140 °С.

2. Асфальт укладывают непосредственно на кабель, если его изоляция способна выдерживать кратковременно температуру 240 °С.

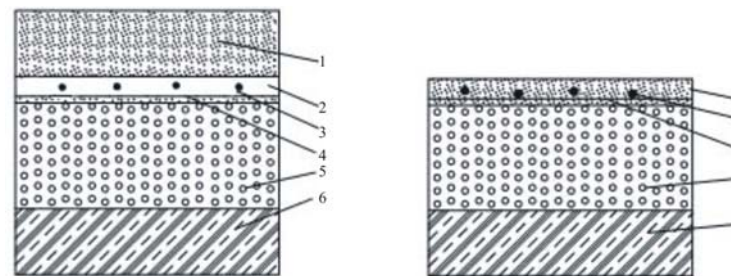


Рис. 3.10. Схема укладки нагревательного кабеля под асфальт: 1 – асфальт; 2 – песок; 3 – кабель; 4 – монтажная лента; 5 – основание из гравия; 6 – грунт

При укладке асфальта желательно не использовать тяжелое оборудование, чтобы не повредить кабель. Минимальная толщина асфальта над кабелем – 50 мм.

Монтаж нагревательных кабелей под бетон и тротуарную плитку выполняют так же, как и монтаж в бетонных полах (рис. 3.11). Поверхность должна быть ровной, без углублений, свободной от острых камней. Кабель крепят к монтажной ленте или стальной арматуре, избегая пересечения термошвов. Бетон должен покрывать кабель и переходные муфты, не содержать воздушных пустот. Обогрев можно включать через 28 дней.

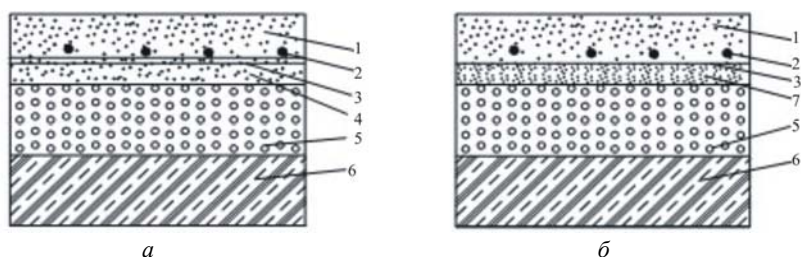


Рис. 3.11. Схема укладки нагревательного кабеля в бетон (а) и песок (б): 1 – бетон; 2 – кабель; 3 – монтажная лента; 4 – бетон; 5 – основание из грунта; 6 – грунт; 7 – песок

Электрообогрев ступеней является эффективным средством удаления льда и снижения травматизма. Ступени, открытые снизу, необходимо теплоизолировать. Если они расположены на грунте, это сделать желательно, но не обязательно.

Удельная поверхностная мощность обогрева ступеней всегда должна быть выше мощности обогрева площадки перед ними. В противном случае не исключены несчастные случаи. Витки кабелей укладывают на горизонтальную поверхность ступеней равномерными петлями, как можно ближе к краям каждой ступени (рис. 3.12). Толщина бетонного покрытия над кабелем 30–50 мм.

Электрообогрев крыш, желобов, водостоков и ендовых применим к любой конструкции кровли. Удельная мощность обогрева зависит от типа крыши.

«Холодная крыша». Это хорошо теплоизолированная крыша, часто с проветриваемым подкровельным пространством. Наледь образовывается, когда снег тает на солнце, при температуре возду-

ха не ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мощность подогрева в этом случае минимальна, и часто подогрев применяют только в водостоках.

«Теплая крыша». Это плохо теплоизолированная крыша. Снег тает при температуре не ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. К этому типу относят большинство крыш старых административных зданий с чердаком. Для них необходима полномасштабная система снеготаяния, более мощная, чем на «холодных крышах».

«Горячая крыша». Это плохо теплоизолированная крыша, у которой чердак часто используют в технических или жилых целях. Снег тает при температуре даже ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Успех электрообогрева таких крыш далеко не всегда предопределен.



Рис. 3.12. Схема укладки и подключений кабеля при обогреве ступенек

Нагревательный кабель укладывают витками вдоль края крыши, а не в виде сплошной линии (рис. 3.13). Кабель следует надежно закрепить. В некоторых случаях поверх кабеля укладывают защитный лист из того же металла, что и основная кровля. Это защищает кабель от механических повреждений, солнечных лучей, упавших листьев и семян растений. Кровля должна быть оборудована снегозадержателями, установленными на расстоянии 0,05–0,1 м от края крыши.

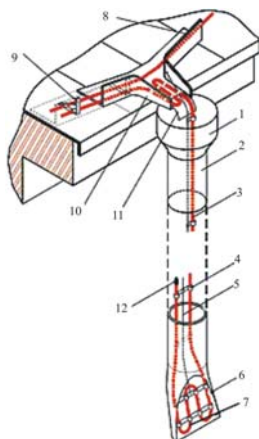


Рис. 3.13. Обогрев водосточной трубы большого диаметра и желоба:
 1 – водоприемная воронка; 2 – водосточная труба; 3 – нагревательный кабель; 4 – крепежный зажим; 5 – трос; 6 – отмет; 7 – усиленный обогрев отмета; 8 – водосборный желоб; 9 – кронштейн, крепящий кабель к желобу; 10 – направляющий лоток; 11 – поворотный элемент, обеспечивающий плавный изгиб кабеля; 12 – концевая муфта

В желобах нагревательные кабели укладывают параллельными линиями, на определенном расстоянии, при помощи специального пластикового крепления. Для «холодных крыш» чаще всего достаточно двух линий, для «теплых» – 3, 4 линии кабеля (рис. 3.14).

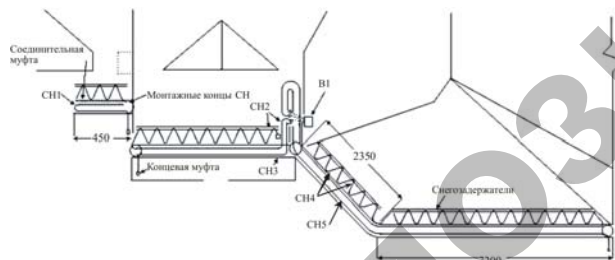


Рис. 3.14. Схема укладки нагревательного кабеля на краю крыши и в водостоках (СН – секция нагревателя)

В водостоках кабель подвешивают на тросе или цепи, закрепленных за крышу. Чаще всего достаточно одной линии кабеля.

3.4. Электрообогрев растительного грунта

Электроподогрев грунта используют в теплицах, оранжереях, на полях для игры в футбол и гольф. Подогрев слоя почвы увеличивает продуктивность растений, продлевает сезон сбора урожая и пользования игровым полем.

Мощность для подогрева грунта 50–100 Вт/м². Мощность кабеля не должна превышать 18 Вт/м, так как при слишком высокой температуре возникает риск высыхания и повреждения корней.

В теплицах, чтобы теплота не уходила вниз, необходимо использовать теплоизоляцию с низким влагопоглощением, например, вспененный полистирол. Теплоизолятор покрывают слоем песка толщиной 100 мм, в который укладывают нагревательный кабель. При этом слой песка над кабелем должен быть 50 мм. Шаг укладки кабеля примерно 150 мм. Поверх песка укладывают сетку или мат для защиты кабеля от повреждений лопатами и другими инструментами. Поверх песка насыпают растительный грунт (рис. 3.15). Термопреобразователь регулятора устанавливают в песке. Температура грунта зависит от вида растений и их возраста (прил. П.1.1).

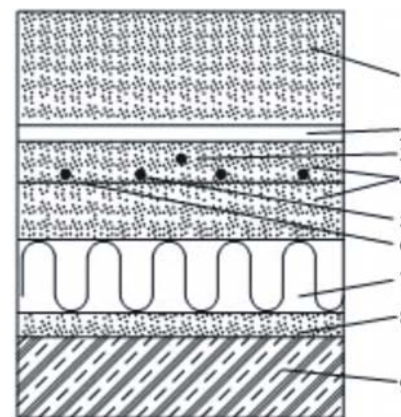


Рис. 3.15. Схема укладки кабеля при обогреве почвы:
 1 – растительный грунт; 2 – защитная сетка; 3 – термопреобразователь; 4 – песок;
 5 – нагревательный кабель; 6 – монтажная лента; 7 – термоизоляция; 8 – песок;
 9 – грунт

На игровых полях кабель укладывают с помощью специального плуга на глубину 200–300 мм (рис. 3.16), шаг укладки составляет 200–400 мм.

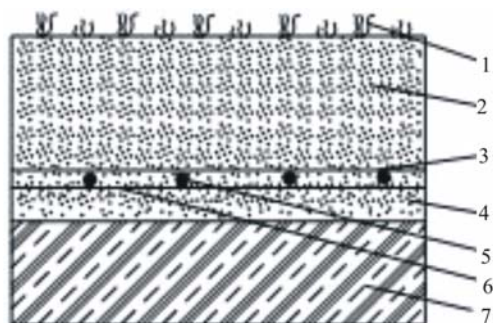


Рис. 3.16. Схема укладки кабеля при обогреве газонов:
1 – трава; 2 – растительный грунт; 3 – защитная сетка; 4 – песок;
5 – нагревательный кабель; 6 – монтажная лента; 7 – грунт

Поверхность грунта сильно не повреждается и готова к использованию спустя 10–15 дней после монтажа. Температура на глубине приблизительно 100 мм от поверхности поля 6–10 °С. Для поддержания теплоты и влажности неиспользуемое поле накрывают пленкой или подобным материалом. Следует помнить, что для футбольного поля международного стандарта (70×110 м) установленная мощность электрообогрева составляет 400–750 кВт. Но эта мощность всегда есть, т. к. подобные поля оснащены мощными осветительными установками, используемыми только в период игры.

3.5. Электрообогрев трубопроводов и резервуаров

Электроподогрев используют для защиты от замерзания и для поддержания требуемой температуры жидкости внутри трубы. Устройство подогрева можно монтировать на наружной части или внутри трубы, проложенной над или под землей. Подогрев исключает наледь на трубах, обеспечивает постоянную вязкость и равномерное течение жидкости, позволяет производить установку труб на любой глубине в земле.

Нагревательный кабель укладывают спиралью, прямой или волнистой линией непосредственно на поверхности трубы и приклеивают липкой алюминиевой лентой (рис. 3.17). Трубу вместе с кабелем теплоизолируют пенопластом, минеральной ватой или другим материалом толщиной от 10 до 50 мм; изоляцию защищают от сырости и влаги. Электрообогреваемые трубы оснащают специальной надписью: «Внимание: нагревательный кабель 220 В», которую размещают на трубе, если она проложена в воздухе, или на специальной пластиковой ленте, расположенной над трубой (в земле).

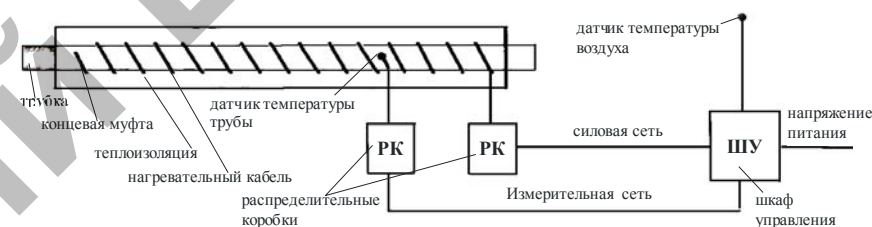


Рис. 3.17. Схема устройства электрообогрева трубопровода

В большинстве случаев мощности кабеля 10 Вт на метр длины трубы достаточно для защиты от замерзания, если наружный диаметр трубы не превышает 50 мм, толщина изоляции не менее 50 мм, а наружная температура не ниже –30 °С.

Примеры монтажа систем электрообогрева на поверхности трубопровода и резервуара показаны на рис. 3.18, 3.19.

Установка нагревательного кабеля внутри трубы весьма эффективна с точки зрения теплотерь. Оболочка кабеля из пищевого полиэтилена безвредна и не влияет на вкусовые качества жидкости в трубе.

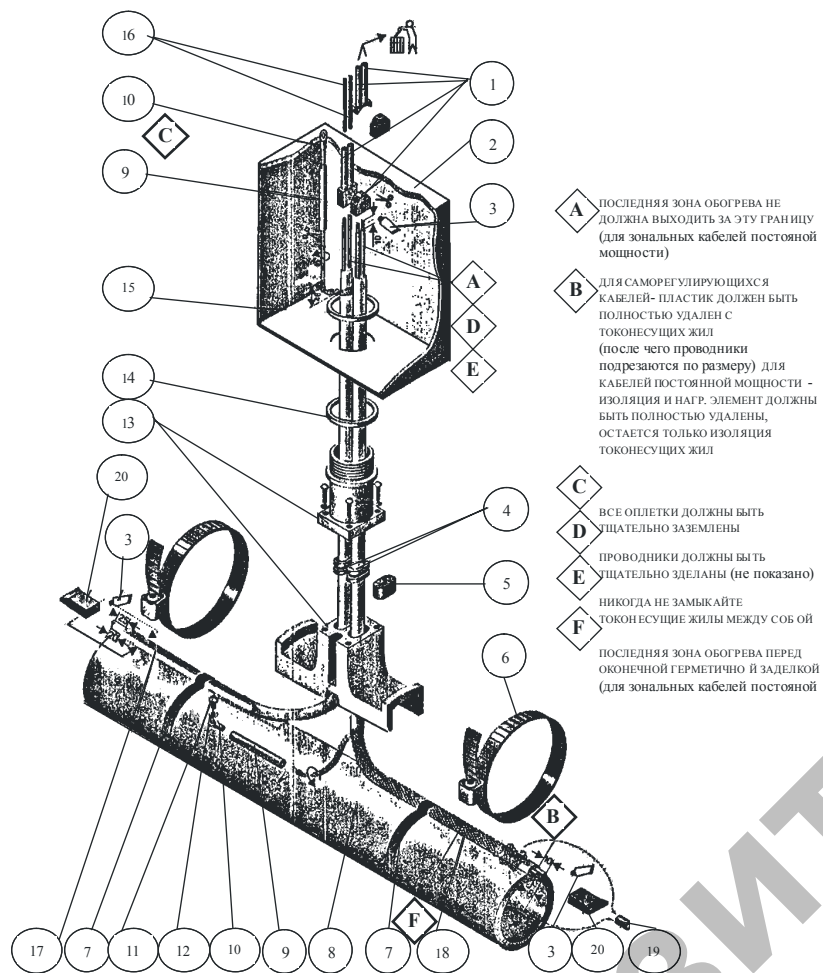


Рис. 3.18. Схема монтажа нагревательного кабеля на трубе с помощью устройства DESTU: 1 – наконечники для токонесущих жил; 2 – монтажная коробка (входы не показаны); 3 – силиконовый клей-герметик; 4 – уплотнения для кабелей; 5 – уплотнение-заглушка (когда заделан один кабель); 6 – крепежный хомут; 7 – крепежная лента; 8 – труба; 9 – кембрик для заземления (желто-зеленый); 10 – кольцевой клеммный контакт; 11 – винт; 12 – шайба гровера; 13 – устройство DESTU; 14 – волокнистое кольцо; 15 – стопорное кольцо; 16 – удлинительная трубка (если длина жил мала); 17 – саморег. нагрев. кабель в оплетке и оболочке; 18 – кабель постоянной мощности в оплетке; 19 – обжимная трубка; 20 – оконцеватель-заглушка для кабеля

- A** ПОСЛЕДНЯЯ ЗОНА ОБОГРЕВА НЕ ДОЛЖНА ВЫХОДИТЬ ЗА ЭТУ ГРАНИЦУ (для зональных кабелей постоянной мощности)
- B** ДЛЯ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ КАБЕЛЕЙ – ПЛАСТИК ДОЛЖЕН БЫТЬ ПОЛНОСТЬЮ УДАЛЕН С ТОКОНЕСУЩИХ ЖИЛ (после чего проводники подрезаются по размеру) для кабелей постоянной мощности – изоляция и нагрев. элемент должны быть полностью удалены, остается только изоляция токонесущих жил
- C** ВСЕ ОПЛЕТКИ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ТЩАТЕЛЬНО ЗАЗЕМЛЕНЫ
- D** ПРОВОДНИКИ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ТЩАТЕЛЬНО ЗАДЕЛАНЫ (не показано)
- E** НИКОГДА НЕ ЗАМЫКАЙТЕ ТОКОНЕСУЩИЕ ЖИЛЫ МЕЖДУ СОБОЙ
- F** ПОСЛЕДНЯЯ ЗОНА ОБОГРЕВА ПЕРЕД ОКОНЕЧНОЙ ГЕРМЕТИЧНО И ЗАДЕЛКОЙ (для зональных кабелей постоянной мощности)

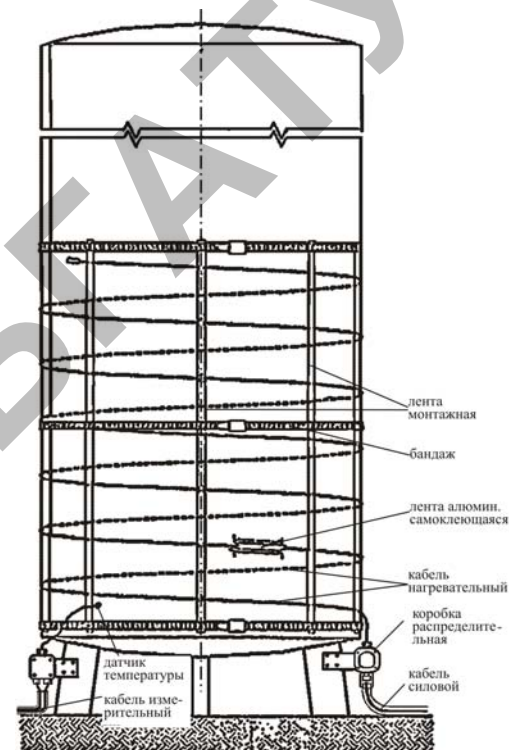


Рис. 3.19. Схема монтажа нагревательного кабеля на вертикальном резервуаре

3.6. Выбор нагревательных проводов и кабелей

Нагревательный кабель выбирают по назначению или преимущественной области использования, по напряжению питания, мощности. При этом учитывают особенности окружающей среды (взрывоопасность, коррозионность, солнечное облучение и др.)

Задача выбора состоит в определении типа, марки и длины нагревательного кабеля, шага его укладки. Длина кабеля должна обеспечивать требуемую мощность нагревательного устройства.

Преимущественная область использования кабелей указана в табл. 3.2. Напряжение питания дано в технических характеристиках кабелей (прил. 11).

Таблица 3.2.

Рекомендуемые области использования кабелей

Обогреваемый объект	Тип и марка кабеля			
	Проволочные	Саморегулирующиеся	Зональные	Скин-кабель
Полы производственных и бытовых помещений	НО, БНО, НБ, БНБ	FSM		
Футбольные поля, беговые дорожки, корты	НО, НБ, БНБ			
Теплицы, дороги, пандусы, лестницы, тротуары	НБ, БНБ, SM-B			
Линии сушки железобетонных изделий	НБ, БНБ			
Водосточные трубы до 50 м, желоба, лотки, ендовы, капельники		FSLe, FSR, GTe, SM-A, SM-B		
Водосточные трубы свыше 50 м, крыши с бетонным или асфальтовым покрытием	НБ	SM-B	EMTS, MTSS	
Водопроводы и баки питьевой воды с прогревом для обеззараживания		HW-R, HW-P		
Трубопроводы и резервуары, защита от замерзания	НБ	FSLe, FSR, GTe, SM-A, SM-B		
Трубопроводы и резервуары, поддержание температуры	НБ, СНО	FSR, FSS, FSP	EMTS, MTSS, EMTF, MTF, PHT, АНТ	
Магистральные трубопроводы	HTS1F, HTS3F			КСС
Газоанализаторные трубки		FSM, FSLe		
Железобетонные рельсы, стрелки	РБ, БНБ			
Узлы кондиционеров	НКК*	FSM, FSLe	АНТ	
Технологической оборудовании (экструдеры, пресс-формы и др.)	ВНО, ВНС, СНО			

* Взрывоопасные зоны – обязательно применение кабелей с экранирующей оплеткой. Коррозионная среда – обязательна оболочка кабеля из фторполимера.

Мощность нагревательного устройства, Вт, необходимая для обогрева плоских поверхностей

$$P = \kappa_s \varphi_s A. \quad (3.1)$$

трубопроводов

$$P = \kappa_l \varphi_l L_T, \quad (3.2)$$

где $\kappa_s = 1, 1...1, 2$ – коэффициент запаса мощности;

φ_s, φ_l – удельная поверхностная и линейная мощность обогрева, соответственно Вт/м² и Вт/м;

A, L_T – площадь или длина обогреваемой поверхности, м², м.

Разумеется, что (3.2) всего лишь частный случай (3.1). Рекомендуемые допустимые удельная поверхностная мощность φ_s при обогреве различных объектов и линейная мощность кабеля φ_k даны в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Рекомендуемые мощности обогрева

Обогреваемый объект	Удельная мощность обогрева Вт/м ² , Вт/м	Линейная мощность нагревательного кабеля, Вт/м		
		Проволочные	Саморегулирующиеся	Зональные
Полы производственных и бытовых помещений	100–150	15–20	11–17	
Теплоаккумулирующие полы	140–200	15–25		
Холодильные камеры	5–15	3–5		
Футбольные поля	90–110	16–18		
Беговые дорожки	150–200	20–30		
Теплицы	100–120	10–15		
Дороги, пандусы	250–300	25–35	80	
Лестницы	300–400	25–35	80	
Водосточные системы	150–250	20–30	17–80	30–50
Водопроводы	10–40*	10–20	10–30	
Нефтепроводы	20–80*	15–25	17–55	20–60
Резервуары	30–100	15–25	25–55	20–30
Технологическое оборудование	100–150	100–250	25–55	20–60
Полы для содержания: цыплят	200			
поросят массой до 20 кг	200			
свиней от 20 до 50 кг	150			
свиней более 50 кг	100			
телят до 3 месяцев	150			

Таблица 3.5

Зависимость k_1 от теплопроводности изоляции

Теплопроводность изоляции, Вт/(м·°С)	Значение k_1
0,025–0,035	0,75
0,035–0,045	1,00
0,045–0,055	1,25
0,055–0,065	1,50

Эффективность обогрева трубопроводов зависит от их длины и назначения обогрева (защита от замерзания или поддержание температуры жидкости в трубе). При выборе кабелей для этих целей необходимо учитывать рекомендации табл. 3.4 и рис. 3.20 [12]. Линейную мощность обогрева трубопроводов, Вт/м, рассчитывают по формуле:

$$\varphi_l = k_3 \varphi_T k_1 k_2 k_3 ; \quad (3.3)$$

где φ_T – расчетные теплототери трубопровода, Вт/м;

k_1 – коэффициент, учитывающий теплопроводность изоляции (табл. 3.5);

k_2 – учитывает расположение трубы (в открытом воздухе $k_2 = 1$, в помещении $k_2 = 0,9$);

k_3 – коэффициент учитывает материал трубы (металл $k_3 = 1$, пластмасса $k_3 = 0,7$).

Таблица 3.4

Рекомендуемые схемы для обогрева трубопроводов

Цель обогрева	Длина обогреваемого трубопровода					
	до 100 м	от 100 м до 500 м	от 500 м до 1 км	от 1 км до 10 км	свыше 10 км	
Защита от замерзания	1А	1В 2В 3А	1В 2В 3А 4А	3А 3В 4А	4А 4В	
Поддержание температуры процесса, °С	до 65	1А 2А	1В 2В 3А	3А 3В 4А	4А 4В	
	до 135	1А 2А	1В 2В	3А 3В 4А	4А 4В	
	до 200	2А	2В	2В 3А	3В	–
	до 350	2А	2В	2В	–	–

Примечания: 1 – саморегулирующий кабель; 2 – зональный кабель; 3 – кабель типа Лонглайн; 4 – скин-эффект; А – без сопроводительной линии подачи; В – с сопроводительной линией подачи питания.

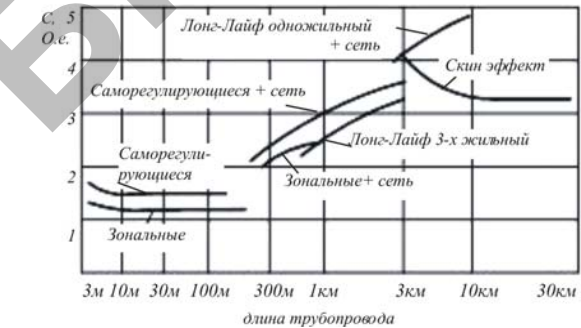


Рис. 3.20. Относительная стоимость С электрообогрева трубопровода

Теплототери трубопровода, Вт/м, можно рассчитать по упрощенной формуле или взять из табл. 3.6:

$$\varphi_T = \frac{2\pi\lambda(t_e - t_n)}{\ln(D/d)} ; \quad (3.4)$$

где λ – теплопроводность материала изоляции трубы, Вт/(м·°С);

t_e, t_n – температура жидкости внутри трубы и среды, окружающей теплоизолированную трубу, °С;

D – диаметр наружный теплоизоляции, м;

d – диаметр наружный трубы, м.

В табл. 3.6 теплототери трубы рассчитаны при теплопроводности материала изоляции 0,04 Вт/(м·°С). Отличие теплопроводности изоляции от принятой в табл. 3.6 учитывают коэффициентом k_1 (табл. 3.5).

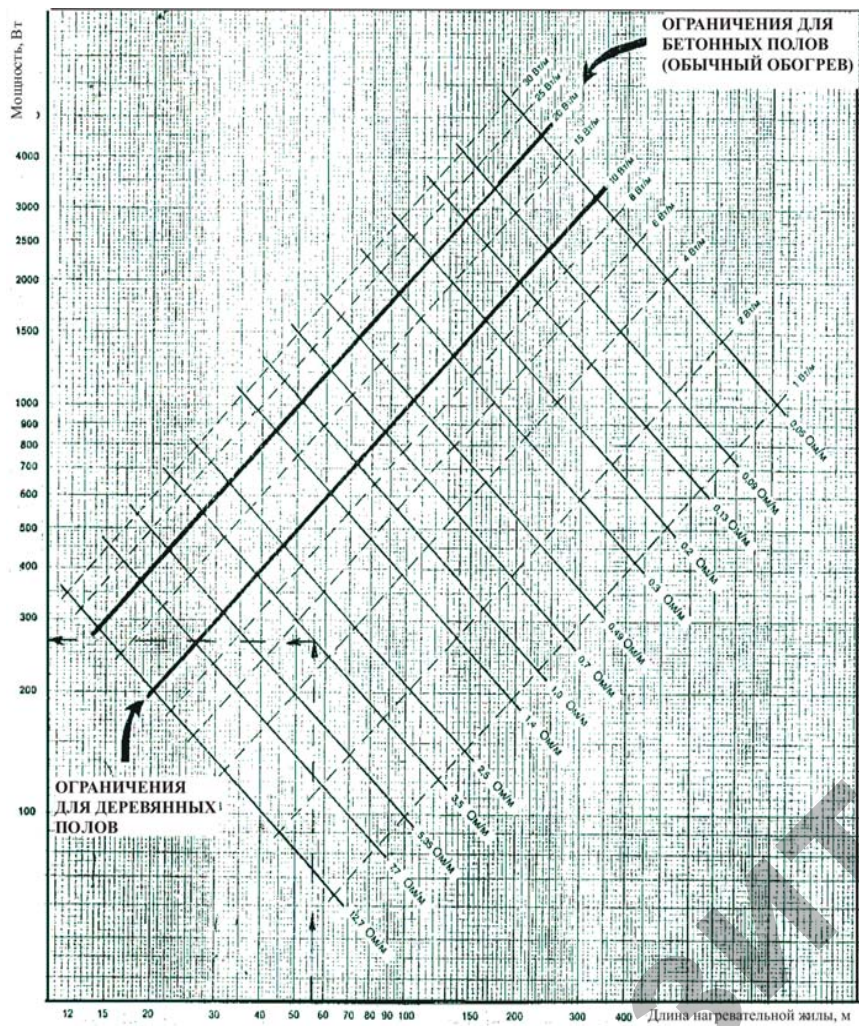


Рис. 3.21. Зависимость мощности, выделяющейся в нагревательной жиле, от длины и линейного сопротивления (напряжение питания 220 В)

Расчетные теплотери трубопроводов

Толщина изоляции трубы, мм	Темперопад в изоляции, °С	Диаметр трубы, дюймы/мм																	
		½ 15	¾ 20	1 25	1 ¼ 32	1 ½ 40	2 50	2 ½ 65	3 80	4 100	6 150	8 200	10 250	12 300	14 350	16 400	18 450	20 500	24 600
		Расчетные теплотери трубы, Вт/м																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	20	7,2	8,4	10,0	12,0	13,4	16,2	19	23	29	41	52	64	74	81	92	103	115	137
	30	10,7	12,6	15,0	18,0	20,2	24,4	29	34	43	61	78	95	111	121	138	155	172	205
	40	14,3	16,8	20,0	24,0	26,8	32,5	38	45	57	81	104	127	148	162	184	207	229	274
	60	21,5	25,2	30,0	36,0	40,2	48,7	58	68	86	122	156	191	222	243	276	310	343	411
	80	28,6	33,7	40,0	48,1	53,6	65,0	77	90	114	163	208	255	295	323	368	413	458	548
	100	36,0	42,4	50,3	60,5	67,4	81,7	97	114	144	205	261	320	372	407	463	520	576	689
120	44,5	52,3	62,2	74,8	83,4	101,0	119	140	177	253	322	395	459	502	572	641	711	850	
20	20	4,6	5,3	6,1	7,2	7,9	9,4	11	13	16	22	29	34	40	44	50	56	61	73
	30	6,8	7,9	9,1	10,8	11,9	14,2	16	19	24	33	42	51	60	66	75	83	92	110
	40	9,1	10,6	12,2	14,4	15,8	18,8	22	25	32	44	56	68	80	88	99	111	123	147
	60	13,6	15,7	18,2	21,6	23,9	28,2	33	38	48	67	84	103	120	131	149	167	184	220
	80	18,2	21,0	24,4	28,8	31,8	37,7	44	51	63	89	113	137	160	175	199	222	246	293
	100	23,0	26,4	30,7	36,2	40,0	47,4	55	64	80	112	142	172	202	220	250	180	310	369
120	28,4	32,8	37,9	44,9	49,4	58,7	68	79	99	138	175	212	249	272	309	346	383	456	
30	20	3,6	4,1	4,7	5,5	6,0	7,0	8	9	11	16	20	24	28	31	34	38	43	51
	30	5,4	6,1	7,1	8,2	9,0	1,6	12	14	17	24	30	36	42	46	52	58	64	76
	40	7,3	8,3	9,5	10,9	12,0	14,0	16	19	23	31	40	48	56	61	69	77	85	101
	60	10,9	12,4	14,2	16,4	18,0	21,0	24	28	34	47	59	72	84	91	103	116	128	152
	80	14,5	16,4	18,8	21,8	24,0	28,0	32	37	46	63	79	96	112	122	138	154	170	202
	100	18,2	20,8	23,8	27,6	30,1	35,3	41	47	57	79	100	121	141	153	174	194	214	254
120	22,7	25,7	29,4	34,1	37,3	43,6	50	58	71	98	123	149	174	190	215	240	265	315	

86

Продолжение табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
40	20	3,1	3,5	4,0	4,6	4,9	5,8	7	8	9	12	16	19	22	24	27	29	33	39
	30	4,7	5,3	6,0	6,8	7,4	8,6	10	11	14	19	23	28	33	35	40	44	49	58
	40	6,2	7,1	7,9	9,1	10,0	11,5	13	15	18	25	31	37	43	47	53	59	66	78
	60	9,4	10,6	12,0	13,7	14,9	17,3	20	22	27	37	46	56	65	71	80	89	98	117
	80	12,5	14,0	16,0	18,2	19,9	23,0	26	30	37	50	62	75	87	94	107	119	131	155
	100	15,7	17,6	20,0	23,0	25,1	28,9	33	38	46	63	78	94	109	119	134	150	165	196
120	19,6	22,0	24,8	28,4	31,0	35,9	41	47	57	72	96	116	135	147	166	185	204	242	
50	20	2,8	3,1	3,5	4,0	4,3	5,0	6	7	8	10	13	16	18	19	22	24	27	32
	30	4,2	4,7	5,3	6,0	6,5	7,4	9	10	12	16	19	23	27	29	33	37	40	48
	40	5,6	6,2	7,1	8,0	8,6	10,0	11	13	16	21	26	31	36	39	44	49	66	78
	60	8,4	9,4	10,6	12,0	13,8	15,0	17	19	23	31	39	46	54	58	66	73	80	95
	80	11,3	12,5	14,0	16,1	17,4	19,9	23	26	31	42	51	62	72	78	88	97	107	127
	100	14,2	15,7	17,8	20,2	21,8	25,1	28	32	39	52	65	78	90	98	110	123	135	160
120	17,5	19,6	22,0	25,0	27,0	31,1	35	40	48	65	80	96	112	121	136	152	167	198	
75	20	2,4	2,6	2,9	3,2	3,5	3,9	5	6	7	8	9	11	13	14	15	17	19	22
	30	3,5	3,8	4,3	4,8	5,2	5,9	6	7	9	11	14	17	19	21	23	26	28	33
	40	4,7	5,2	5,8	6,5	7,0	7,8	9	10	12	15	19	22	26	28	31	34	38	44
	60	7,1	7,8	8,6	9,7	10,4	11,8	13	15	17	23	28	33	38	41	46	51	56	66
	80	9,4	10,3	11,5	12,9	13,8	15,6	18	20	23	30	37	44	51	55	62	68	75	88
	100	11,9	13,1	14,5	16,2	17,4	19,7	22	25	29	38	47	56	64	69	78	88	94	111
120	14,6	16,1	17,9	20,0	21,6	24,4	27	31	36	48	58	68	80	86	96	107	117	137	
130	16,1	17,8	19,7	22,1	23,8	26,8	30	34	40	52	64	76	87	95	106	117	129	151	

66

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
100	20	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	17
	30	3,1	3,5	3,7	4,2	4,4	4,8	5	6	7	9	11	13	15	16	18	20	22	26
	40	4,2	4,6	5,0	5,6	6,0	6,7	7	8	10	12	15	18	20	23	24	27	29	34
	60	6,2	6,8	7,6	8,4	9,0	10,1	11	12	15	19	23	27	30	33	36	40	44	51
	80	8,4	9,1	10,1	11,2	12,0	13,4	15	16	19	25	30	35	41	44	49	54	59	69
	100	10,5	11,5	12,7	14,2	15,0	16,8	19	21	24	31	38	45	51	55	61	68	74	86
	120	13,1	14,3	15,7	17,5	18,6	20,9	23	26	30	39	47	55	63	68	76	84	91	107
	130	14,4	15,7	17,3	19,2	20,5	22,9	25	28	33	43	51	61	69	75	83	92	101	118
150	20	1,8	1,9	2,1	2,4	2,5	2,8	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	30	2,8	2,9	3,2	3,5	3,7	4,1	5	5	6	7	9	10	11	12	13	15	16	18
	40	3,6	4,0	4,3	4,7	4,9	5,5	6	7	8	10	11	13	15	16	18	19	21	24
	60	5,4	5,9	6,4	7,1	7,4	8,3	9	10	11	14	17	20	22	24	27	29	32	37
	80	7,2	7,8	8,5	9,4	10,0	11,0	12	13	15	19	23	26	30	32	35	39	42	49
	100	7,9	8,3	9,1	10,4	12,3	13,0	15	17	21	28	32	37	42	45	50	54	59	68
	120	11,3	12,3	13,3	14,6	15,5	17,0	19	21	24	30	35	41	46	50	55	60	66	76
	130	12,4	13,4	14,6	16,1	17,0	18,8	21	23	26	33	39	45	51	55	61	66	72	84

100

150

РЕПОЗИТОРИЙ БГУ

Методики определения длины проволочных, спиральных и зональных, саморегулирующихся кабелей различны. Следует помнить, что при увеличении длины кабеля мощность, выделяющаяся в нем, для первых двух уменьшается, а в зональных и саморегулирующихся – увеличивается.

Проволочные и спиральные кабели. Длина секции одножильного кабеля

$$L_z = \sqrt{U^2 / \varphi_k r_l} ; \quad (3.5)$$

где U – напряжение питания, В;

φ_k – линейная мощность, Вт/м, которую принимают несколько меньше номинальной, указанной в технической характеристике кабеля;

r_l – линейное сопротивление кабеля, Ом/м.

Мощность секции кабеля

$$P_z = \frac{U^2}{L_z r_l} ; \quad (3.6)$$

количество секций кабеля

$$z = P / P_z ; \quad (3.7)$$

общая длина одножильного кабеля

$$L = z L_z . \quad (3.8)$$

Результаты расчета необходимо проверить по мощности, выделяющейся в нагревательном устройстве $P_в$. Она должна быть примерно равной мощности, рассчитанной по (3.1) или (3.2), а линейная выделяющаяся мощность $\varphi_в$ не должна превышать φ_k , рекомендуемую в табл. 3.3:

$$P_в \frac{U^2}{L_z r_l} z \approx P , \quad (3.9)$$

$$\varphi_в \frac{P_в}{L} \leq \varphi_k . \quad (3.10)$$

Зависимость мощности от линейного сопротивления и длины нагревательной жилы кабеля наглядно показывает диаграмма на рис. 3.21 [15]. В основе ее построения лежит (3.5). При известной длине и линейном сопротивлении жилы по этой диаграмме нетрудно определить мощность, выделяющуюся в кабеле.

При трехфазном питании нагревательных кабелей неудобство доставляет расчетное количество секций, которое иногда трудно распределить равномерно по фазам сети. Например, 5 секций не делятся на 3 фазы. Приходится изменять мощность, площадь обогреваемой поверхности, линейную мощность кабеля, чтобы получить количество секций, кратное числу фаз сети.

Шаг укладки кабеля

$$S = A / L . \quad (3.11)$$

Минимальное расстояние между лепестками монтажной ленты для крепления кабеля 25 мм. Если расчетный шаг, например, 37 мм, его необходимо изменить или до 25 или до 50 мм.

Зональные и саморегулирующиеся кабели. Длина этих кабелей в принципе может быть любой. «Греющие» участки подключены параллельно к токоведущим жилам, и выделяющаяся мощность пропорциональна длине кабеля. Линейная мощность в зональных кабелях зависит от сечения проволоки нагревательного элемента, в саморегулирующихся – от свойств полимерного наполнителя и температуры среды, в которой находится кабель. Последнюю зависимость очень характерно показывает рис. 3.22. Саморегулирующаяся нагревательная лента GTe предназначена для защиты крыш и желобов от снега и льда. В снегу или талой воде сопротивление ленты минимально и тепловыделение максимально (участок А). Когда снег начинает таять и вода стекает, сопротивление ленты саморегулируется до половинной мощности (участок В). При потеплении нагревательная лента еще уменьшает свое тепловыделение (участок С).

Длина нагревательного кабеля, м:

$$L = P / \varphi_l \quad \text{или} \quad L = k_s L_T \varphi_l / \varphi_s ; \quad (3.12)$$

длина секции

$$L_z = L / z ; \quad (3.13)$$

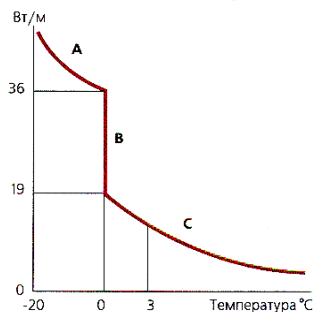


Рис. 3.22. Температурная характеристика мощности саморегулирующегося кабеля

Число секций принимают исходя из числа фаз питающей сети, размеров обогреваемой поверхности, особенностей укладки кабеля.

Перепад между температурой жилы $t_{ж}$ нагревательного кабеля и температурой обогреваемой поверхности $t_{п}$ приближенно (рис. 3.23):

$$t_{ж} - t_{п} = \frac{U_l^2}{2\pi r_l \lambda_{и}} \ln \left(\frac{2S}{\pi d_{ж}} sh \frac{2\pi h}{S} \right) + \Delta t_{и}, \quad (3.14)$$

где $U_l^2 = U / L_z$ – линейное напряжение на нагревательной жиле, В/м;

$\lambda_{и}$ – теплопроводность материала, в котором уложен нагревательный кабель (например бетон, песок), Вт/(м·°C);

$d_{жс}$ – диаметр жилы, м; sh – гиперболический синус;

h – глубина укладки нагревательного кабеля, м.

Перепад температур в слое изоляции жилы нагревательного кабеля, °C,

$$\Delta t_{и} = \frac{\varphi_{к}}{2\pi\lambda_{и}} \ln \frac{d_{и}}{d_{ж}}; \quad (3.15)$$

где $\lambda_{и}$ – теплопроводность изоляции жилы, Вт/(м·°C);

$d_{и}$ – диаметр изоляции жилы, м.

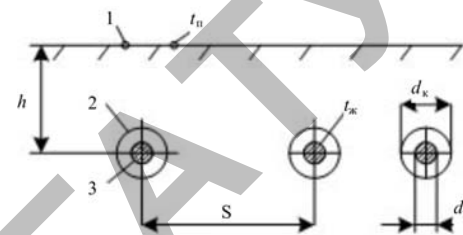


Рис. 3.23. Схема электрообогреваемого пола к расчету теплоперепада $t_{ж}$ – $t_{п}$:
1 – обогреваемая поверхность; 2 – изоляция кабеля;
3 – нагревательная жила; d_k – диаметр кабеля; $d_{ж}$ – диаметр жилы

Пример 3.1. Рассчитать электрообогреваемый пол на участке содержания телят в возрасте до 3 месяцев (рис. 3.24). Температура поверхности пола для телят этого возраста $t_{п} = 28\text{--}32$ °C. Температура воздуха в помещении $t_{а} = 16$ °C.

Для обогрева используем одножильный нагревательный кабель НО13. Нагревательная жила НО13 состоит из трех стальных оцинкованных проволок, диаметр каждой из них – 0,25 мм. Жила изолирована двумя слоями пластика, покрытого оплеткой из медной проволоки сечением 1 мм², и все это залито оболочкой из поливинилхлорида. Диаметр жилы – 0,8 мм. Наружный диаметр кабеля – 5,5 мм. Линейное сопротивление жилы – 1,43 Ом/м. Максимальная температура жилы – 100 °C. Линейная мощность кабеля – 25 Вт/м. Напряжение питания – 220 В.

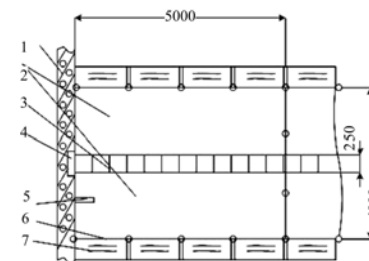


Рис. 3.24. Схема участка содержания телят:
1 – стенка; 2 – обогреваемый пол; 3 – навозоуборочный транспортер; 4 – шкаф питания и управления электрообогреваемым полом; 5 – термопреобразователь в полу; 6 – ограждение участка; 7 – кормушки

Принимаем теплоаккумулирующий пол. Кабель укладываем в бетонную стяжку пола на глубине $h = 70$ мм (рис. 3.23). Теплопроводность бетона $\lambda_n = 0,85$ Вт/(м·°С). Удельную поверхностную мощность принимаем $\varphi_s = 180$ Вт/м². Обогреваемая площадь разделена навозоборочным каналом на два участка. Ориентировочная площадь каждого из участков $S_1 = 9$ м².

Расчетная мощность на обогрев двух участков (3.1)

$$P = 1,1 \cdot 180 \cdot 2 \cdot 9 = 3564 \text{ Вт.}$$

Принимаем 3-фазное питание 380/220 В.
Длина секции одножильного кабеля (3.5)

$$L_i = \sqrt{220^2 / 20 \cdot 1,43} = 41,1 \text{ м.}$$

Мощность, выделяющаяся в секции (3.6),

$$P_i = \frac{220^2}{41,1 \cdot 1,43} = 823,5 \text{ Вт.}$$

Количество секций кабеля (3.7)

$$z = 3564 / 823,5 = 4,3 \text{ секц.}$$

Расчетное количество секций нельзя подключить равномерно на три фазы сети. Попробуем уменьшить количество секций до трех и, пропорционально, площадь обогрева до 12,6 м², учитывая беспривязное содержание и возможность телят выбирать самим теплое место в станке.

В этом случае: мощность на обогрев составляет 2495 Вт; мощность 3-х секций равна 2470 Вт. Равномерной укладке провода мешает навозоборочный транспортер. Расположим две секции на одной стороне от транспортера и одну секцию – на другой. Следует обратить внимание, что на участке укладки двух секций удельная

поверхностная полезность, рекомендуемая для бетонных аккумуляющих полов, значительно превышает принятую:

$$\varphi_s = \left(\frac{220^2 \cdot 2}{41,1 \cdot 1,43} \right) : \frac{12,6}{2} = 261,4 \text{ Вт/м.}$$

Следовательно, нужно или увеличить обогреваемую поверхность до 9 м² на участке двух секций, или одну секцию распределить в полу по обе стороны транспортера. В последнем случае нагревательный провод должен быть проложен в стене над транспортером или разорван и соединен установочным проводом. Примем решение о равномерной укладке провода по поверхности обогрева и разделении секций на обе стороны транспортера, не разрывая провод.

Шаг укладки провода (3.11)

$$S = 12,6 / 3 \cdot 41,1 = 0,1 \text{ м}$$

Температуру пола 28–32 °С поддерживает терморегулятор включением и отключением напряжения питания. Определим температуру жилы провода при температуре пола $t_n = 30$ °С.

Перепад температур в слое изоляции жилы с учетом теплопроводности изоляции 1,8 Вт/(м·°С) (3.15)

$$\Delta t = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,8} \cdot \ln \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 3,41 \text{ °С.}$$

Перепад температур между жилой и поверхностью пола (3.14)

$$t_{ж} - t_n = \frac{(220 / 41,1)^2}{23,14 \cdot 1,43 \cdot 0,85} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 0,075}{3,14 \cdot 0,8} \cdot sh \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,07}{0,075} \right) + 3,41 = 11,9 \text{ °С.}$$

Необходимо отметить, что $sh x = (e^x - e^{-x}) / 2$.

Температура жилы при нагревании пола до 30 °С не превышает допустимую для провода НО:

$$t_{ж} = 30 + 11,9 = 41,9 \text{ °С.}$$

При приближенном расчете, определив мощность электрообогрева, по таблицам прил. 11 подбирают нагревательные секции необходимой мощности и количества. Например, секция ГЛЭ-80: ее длина – 42 м, мощность – 800 Вт, линейная мощность – 19 Вт/м, что практически совпадает с расчетными данными.

Пример 3.2. Рассчитать устройство электрообогрева мелассопровода, соединяющего мелассохранилище и цех гранулирования комбикормов. Длина трубопровода 100 м, толщина изоляции из минеральной ваты 50 мм. Температура трубопровода 30 °С. Расчетная наружная температура воздуха в зимний период –21 °С. Назначение подогрева – поддержание температуры мелассы в трубе для снижения вязкости и облегчения перекачивания.

По табл. 3.4. выбираем схему обогрева 1А – саморегулирующийся кабель без сопроводительной линии подачи питания.

Расчетные теплопотери трубопровода (табл. 3.6.) – 12,5 Вт/м.

Линейная мощность, необходимая для обогрева (3.3),

$$q_p = 1,15 \cdot 12,5 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 1 = 14,4 \text{ Вт/м.}$$

Учитывая рекомендации табл. 3.2, принимаем саморегулирующуюся ленту 17FSR (прил. 11): линейная мощность – 17 Вт/м при 10 °С, максимальная температура нагрева – 65 °С.

Длина кабеля $L = 1,2 \cdot 100 \cdot 14,1 / 17,0 = 101,6$ (м) примерно равна длине трубопровода. Кабель укладываем в нижней части трубы.

Мощность устройства электрообогрева трубопровода

$$P = 1,1 \cdot 101,6 \cdot 17 = 1900 \text{ Вт.}$$

4. ПОВЕРХНОСТНО РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

4.1. Классификация нагревателей

Поверхностно распределенные электрические нагреватели (ПНР) отличаются от трубчатых и протяженных нагревателей малой толщиной и достаточно большой, по отношению к толщине, площадью теплоотдающей поверхности. Конструктивно они состоят из тонкослойного нагревательного элемента, расположенного между слоями изоляции.

ПНР классифицируют: по материалу (металлические, полупроводниковые) и виду нагревательного элемента (фольгированные, проволочные, композиционные и др.); материалу, изолирующему нагревательный элемент (полиамидные, силиконовые, миканитовые и др.); допустимой рабочей температуре, которая зависит от вида изолирующего материала и способа крепления нагревателя на обогреваемой поверхности.

В качестве материалов, изолирующих нагревательный элемент, используют пленку из полиамида и полиэстера, кремнийорганическую резину (силикон), миканит. Поэтому нагреватели часто называют силиконовыми, миканитовыми, или, например, «Нагреватели Karton» (торговая марка определенного вида полиамидной пленки). Материал изоляции определяет удельную мощность нагревателя и, следовательно, температуру его поверхности и даже ее размер (табл. 4.1) [16–19].

Таблица 4.1

Влияние материала изоляции на характеристики нагревателей [16]

Материал изоляции	Характеристики нагревателя		
	Диапазон температуры, °С	Максимальный размер, мм	Максимальное сопротивление, 10^4 Ом/м^2
Полиэстер прозрачный	–55–120	280×560	93–185
Полиамид (Karton)	–200–200	250×600	8–70
Кремнийорганическая резина	–45–235	600×1800	31
Миканит	–150–600	600×1200	1,8

Полиамидная изоляция представляет собой тонкий, полупрозрачный материал с хорошими диэлектрическими свойствами. Она может быть использована в воздухе, вакууме, воде, маслах, устойчива к кислотам и щелочам, кроме NaOH. Максимально допустимая температура 200 °С.

Кремнийорганическая резина (силикон) выглядит как шероховатый, эластичный материал. Наиболее подходит для изготовления промышленных нагревателей, устойчива ко многим химическим веществам, однако не годится для использования в вакууме и, длительно, в маслах. Максимальная допустимая температура – 235 °С.

Миканитовая изоляция допускает наиболее высокую температуру нагревателя (до 600 °С), может иметь плоскую или изогнутую в заводских условиях поверхность.

Максимальная мощность и температура, которые может выделять нагреватель, зависят не только от вида изоляции, но и от клея, соединяющего нагревательный и изолирующий слои, а также способа крепления ПРН на обогреваемой поверхности, характеристик регулятора температуры, нагреваемой среды и места установки его первичного преобразователя. ПРН крепят на обогреваемой поверхности акриловой лентой, покрытой клеем; приклеиванием, например, эпоксидной смолой; прижатием или другим механическим способом. Максимальная температура поверхности при этих способах 150, 115 и 180 °С, при механическом прижатии – значительно выше.

4.2. Фольгированные нагреватели

Фольгированные ПРН изготавливают из тонкого (0,25 мм) листа сплава металлов на основе никеля (рис. 4.1). На этой фольге, по определенному рисунку, вытравливают электрическую цепь, которая и является нагревательным элементом при протекании по ней тока. Травленную фольгу размещают между слоями изоляции и скрепляют их между собой вулканизацией или другим методом. Токоподводящие провода крепят к фольге пайкой или сваркой. Изоляция может быть полиамидная, силиконовая или миканитовая. Типовые конфигурации фольгированных нагревателей показаны на рис. 4.2 и в прил. 12. Для нагревателей прямоугольной формы размер X может быть от 6 до 280 мм, размер Y – от 6 до 460 мм. Нагре-

ватели круглой формы имеют внутренний диаметр от 2 до 120 мм, а наружный от 12 до 250 мм. Толщина нагревателя зависит от вида изоляции и лежит в диапазоне от 0,5 до 6,0 мм (миканитовая изоляция). Удельный вес нагревателей с полиамидной и силиконовой изоляцией составляет 2,1 кг/м², у миканитовых – больше.

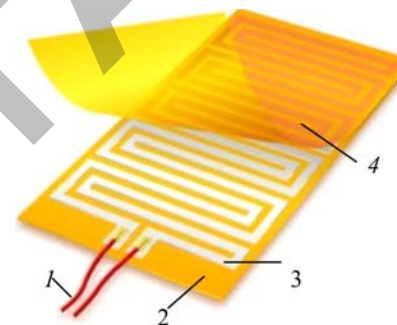


Рис. 4.1. Фольгированный поверхностно распределенный нагреватель: 1 – токопроводящие провода; 2, 4 – изоляция; 3 – нагревательный элемент

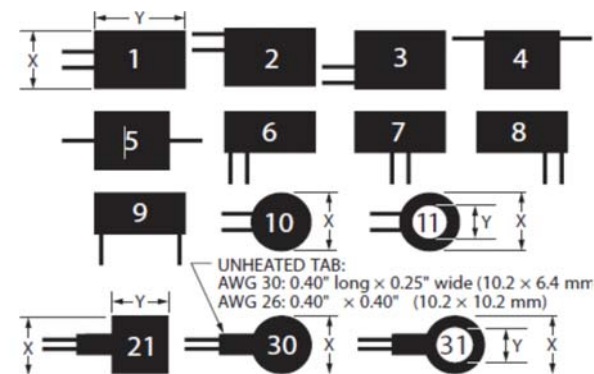


Рис. 4.2. Типовые конфигурации фольгированных и проволочных нагревателей с полиамидной (Картон), силиконовой и миканитовой изоляцией (размеры X , Y – в прил. 12, 13, 14)

Зависимость удельной мощности нагревателей от вида изоляции и способа его крепления на обогреваемой поверхности показана на рис. 4.3.

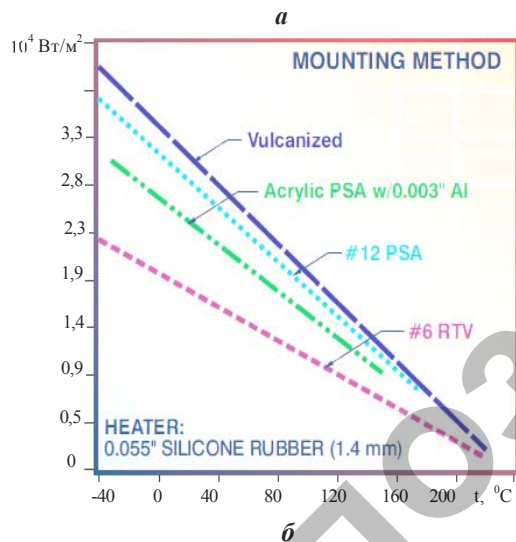
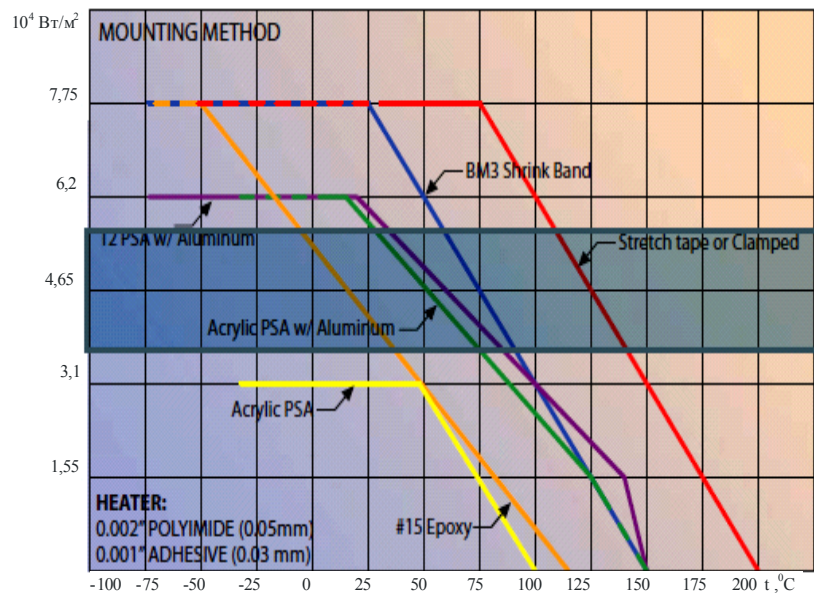


Рис. 4.3. Зависимость максимально допустимой мощности фольгированных нагревателей с полиамидной (а) и силиконовой (б) изоляцией от температуры нагреваемой среды и способа соединения нагревателя с обогреваемой поверхностью

4.3. Проволочные нагреватели

Проволочный ПРН (рис. 4.4) представляет собой оцинкованную проволоку из сплава с высоким электрическим сопротивлением, уложенную по определенному рисунку (например, зигзагом) между слоями изоляции и скрепленную с ней одним из способов. Проволочные нагреватели экономичнее фольгированных при больших размерах, удельная поверхностная мощность у них ниже, а допустимая температура выше (прил. 13, 14). Диаметр проволоки зависит от мощности и назначения нагревателя. Например, в прозрачных для света нагревателях используют проволоку диаметром 0,02–0,05 мм, располагаемую между двумя слоями из полиэстера, пропускающими более 82 % света (прил. 15), а в устройствах обогрева резервуаров диаметр проволоки более одного миллиметра (рис. 4.5, прил. 16).

Удельная поверхностная мощность, как и в предыдущих конструкциях, зависит от метода монтажа нагревателя и его температуры (рис. 4.6).

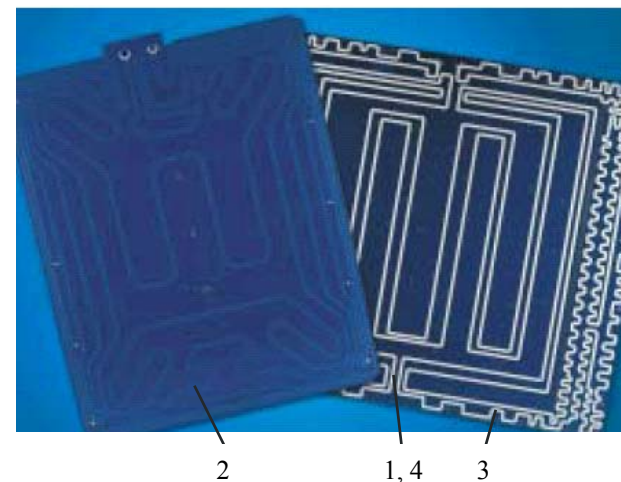


Рис. 4.4. Проволочный ПРН

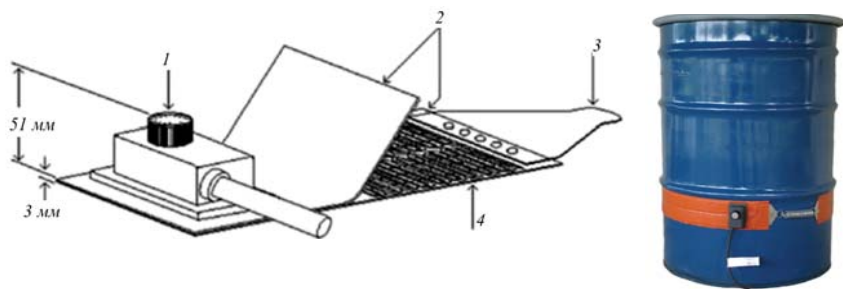


Рис. 4.5. Проволочный обогреватель резервуаров:
 1 – терморегулятор; 2 – стеклотекстолитовая основа, усиленная силиконовой резиной;
 3 – устройство для крепления нагревателя на резервуаре; 4 – проволочный зигзагообразный нагреватель

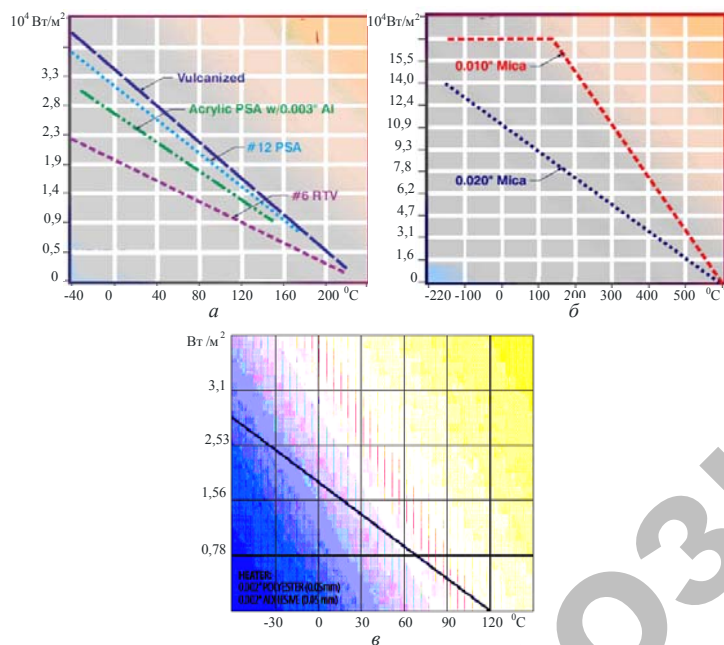


Рис. 4.6. Зависимость максимально допустимой мощности проволочных поверхностно распределенных нагревателей с силиконовой (а), миканитовой (б) изоляцией и прозрачных (в) от температуры нагреваемой среды и способа монтажа нагревателя на обогреваемой поверхности

4.4. Композиционные нагреватели

Композиционный, или тонкопленочный, нагреватель (рис. 4.7) на основе дисперсных токопроводящих частиц – порошков – представляет собой токопроводящую пленку, толщиной 0,1–0,2 мм, нанесенную на изолированную металлическую керамическую или иную основу. В качестве токопроводящих материалов используют порошки металлов (алюминия, железа, никеля и др.), угольную или графитовую пыль, которые смешивают с наполнителем-пластификатором и наносят типографическим или лакокрасочным методом на основу. Нанесенную массу сушат, после чего на токопроводящую поверхность крепят контактные электроды и токопроводящие провода. На конечном этапе изготовления всю поверхность изолируют диэлектриком. Например, композиционный нагреватель на основе нитрида алюминия, нанесенный методом фотолитографии на изолированный лист нержавеющей стали и сверху покрытый изолирующей пленкой, имеет следующие характеристики: толщина нагревателя от 0,6 до 12,5 мм; удельная поверхностная мощность от $3,5 \cdot 10^4$ до $23,2 \cdot 10^4$ Вт/м². Температура в воздухе до 300 °С.

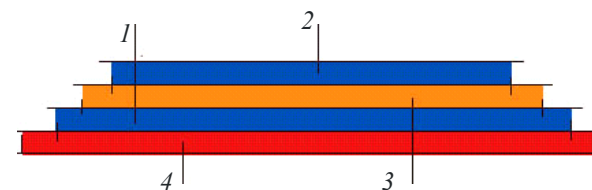


Рис. 4.7. Композиционный поверхностно распределенный нагреватель:
 1 – основа диэлектрическая; 2 – покрытие диэлектрическое; 3 – нагревательный элемент; 4 – несущая основа (например, стальной лист)

4.5. Расчет и выбор поверхностно распределенных нагревателей

Расчет поверхностно распределенных нагревателей необходим при разработке новых конструкций. Методика расчета фольгированных и проволочных ПРН принципиально не отличается от методики расчета нагревательных элементов по удельной мощности, приведенной в подразделе 1.5. Методика расчета композиционных нагревателей подробно разработана в [20].

Типовые поверхностно распределенные нагреватели выбирают по тем же критериям, что и трубчатые или протяженные. Основными из них, как известно, являются мощность, геометрические размеры, соответствие нагреваемой среде. Основным критерием оценки правильности выбора нагревателя служит удельная поверхностная мощность нагревателя φ_1 . Во всех случаях она должна быть не более удельной поверхностной мощности, допустимой для данного нагревателя $\varphi_{н.д}$ и для нагреваемой среды $\varphi_{с.д}$. Сложность состоит в определении удельной допустимой мощности для нагреваемой среды, ее ориентировочное значение можно принять из табл. 2.5. Значение удельной поверхностной мощности нагревателя можно рассчитать, исходя из технических характеристик поверхностно распределенных нагревателей и способа его монтажа на обогреваемой поверхности (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Пример выбора поверхностно распределенного нагревателя

1. Требуемая температура обогреваемой поверхности, °С	60	100	100	150
2. Напряжение питания, В	127	220		380
3. Требуемая мощность, Вт	300	500		2500
4. Размер обогреваемой поверхности, мм	75×150	50×250		Ø 225
5. Требуемое сопротивление, Ом	$127^2:300=53,8$	$220^2:500=98,8$		$380^2:2500=57$
6. Способ крепления на обогреваемой поверхности	Лента эластичная	Клей	Вулканизация	Зажим механический
7. Принятая модель нагревателя	НК5468, R=46,1 Ом	HR 6653, R=96,0 Ом		HM 6810, R=83,4 Ом
8. Размер нагревателя, м ²	0,01	0,012		0,038
9. Мощность нагревателя, Вт	$127^2:46,1=350$	$220^2:96,0=504$		$380^2:83,4=17$
10. Удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/м ²	35 000	42 000		45 553
11. Максимальная допустимая удельная мощность нагревателя, Вт/м ²	557 800	29 450	55 800	83 700

В табл. 4.2 первая строка получена на основе расчета мощности на нагревание материала, вторая принята с учетом возможности подключения нагревателя на напряжение 127, 220 или 380 В. Размер обогреваемой поверхности является величиной заданной, зависящей от размеров устройства, в котором будет размещен нагреватель. Пятая строка – требуемое сопротивление нагревателя рассчитано согласно требуемой мощности и напряжению питания. Способ крепления нагревателя к обогреваемой поверхности принят исходя из возможных вариантов крепления. Модель нагревателя принята из прил. 12, 13, 14. НК, HR, HM – обозначают соответственно нагреватель (Н) с полиамидной (К), силиконовой (R) и micaнитовой (M) изоляцией. Размер этих нагревателей (эффективная площадь) принят из упомянутых приложений. Строка десятая табл 4.2 получена делением девятой на восьмую строку. Максимально допустимая удельная мощность нагревателя принята по рис. 4.3 и 4.6.

Заключительная одиннадцатая строка показывает, что нагреватель HR6653 не может быть использован в случае его крепления на обогреваемой поверхности с помощью клея. Удельная мощность нагревателя (42 кВт/м²) больше максимальной допустимой (29,45 кВт/м²). Другие нагреватели соответствуют величине максимальной допустимой мощности при принятом способе монтажа.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Репозиторий БГАТУ

Номенклатура трубчатых электронагревателей Минского завода ТЭНов

П.1.1 ТЭНы для нагрева воды, щелочей, кислот

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус гйба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,001	ТЭН-200В13/0.6P220	0,6	2,7	81,5	978		—	100	958	—	44	1,4	1.1
1,002	ТЭН-50А13/0.8J36	0,8	22	1,64	237		—	70	217	—	29	0,4	1.1
1,003	ТЭН-32А13/1.0J220	1,0	4,5	48,9	148		—	65	128	—	26	0,2	1.1
1,004	ТЭН-40А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	189		—	60	169	—	24	0,3	1.1
1,005	ТЭН-40А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	184		—	80	164	—	34	0,3	1.1
1,006	ТЭН-42А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	182		—	120	162	—	54	0,3	1.1
1,007	ТЭН-60А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	288		—	65	268	—	26	0,4	1.1
1,008	ТЭН-60А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	267		—	70	267	—	29	0,4	1.1
1,009	ТЭН-60А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	278		—	100	258	—	44	0,4	1.1
1,010	ТЭН-80А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	387		—	70	367	—	29	0,5	1.1
1,011	ТЭН-140А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	687		—	70	667	—	29	1	1.1
1,012	ТЭН-75А13/1.0P220	1,0	4,5	48,9	297		—	200	277	—	30	0,5	1.2
1,013	ТЭН-80А13/1.0J220	1,0	4,5	48,9	262	82	150	80	50	—	34	0,6	1.8
1,014	ТЭН-50А13/1.25P220	1,25	5,7	38,6	239		—	60	219	—	24	0,3	1.1
1,015	ТЭН-55А13/1.25P220	1,25	5,7	38,6	261		—	73	241	—	30	0,4	1.1
1,016	ТЭН-60А13/1.25J220	1,25	5,7	38,6	292		—	50	272	—	19	0,4	1.1
1,017	ТЭН-60А13/1.25P220	1,25	5,7	38,6	286		—	73	266	—	30	0,4	1.1
1,018	ТЭН-60А10/1.5P220	1,5	6,8	32,4	292		—	45	272	—	18	0,4	1.1
1,019	ТЭН-32А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	149		—	60	129	—	24	0,2	1.1
1,020	ТЭН-40А13/1.5J220	1,5	6,8	32,4	187		—	70	167	—	29	0,3	1.1

118

Продолжение прил. П.1.1

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус гйба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,021	ТЭН-40А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	18		—	65	168	—	26	0,3	1.1
1,022	ТЭН-42А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	19		—	60	179	—	24	0,3	1.1
1,023	ТЭН-50А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	24		—	56	221	—	22	0,3	1.1
1,024	ТЭН-50А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	23		—	70	217	—	29	0,3	1.1
1,025	ТЭН-60А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	29		—	53	271	—	20	0,4	1.1
1,026	ТЭН-70А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	33		—	70	317	—	29	0,5	1.1
1,027	ТЭН-70А13/1.5P380	1,5	3,9	97,4	33		—	65	318	—	26	0,5	1.1
1,028	ТЭН-80А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	38		—	65	368	—	26	0,5	1.1
1,029	ТЭН-100А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	48		—	70	467	—	29	0,7	1.1
1,030	ТЭН-100А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	47		—	100	458	—	44	0,7	1.1
1,032	ТЭН-50А13/1.5J220	1,5	6,8	32,4	16	—	62	50	140	—	25	0,4	1.1
1,033	ТЭН-50А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	14	—	82	50	180	—	25	0,3	1.1
1,034	ТЭН-50А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	13	—	92	55	110	—	25	0,3	1.1
1,035	ТЭН-68А13/1.5P220	1,5	6,8	32,4	16	—	102	50	140	—	25	0,4	1.5
1,036	ТЭН-60А13/1.6J220	1,6	7,2	30,5	28		—	60	269	—	24	0,4	1.5
1,037	ТЭН-36А13/1.6P220	1,6	7,3	30,1	17		—	55	151	—	21	0,2	1.5
1,038	ТЭН-40А13/1.6P220	1,6	7,3	30,1	18		—	73	166	—	30	0,3	1.5
1,039	ТЭН-120А13/1.6J380	1,6	4,2	90,5	58		—	73	566	—	30	0,9	1.5
1,041	ТЭН-78А13/1.8P220	1,8	8,2	26,8	12	13	64	50	108	—	19	0,5	1.1
1,042	ТЭН-90А8/2.0J220	2,0	9,1	24,2	44	5	—	40	427	—	16	0,7	1.1
1,043	ТЭН-70А10/2.0P220	2,0	9,1	24,2	33		—	55	323	—	23	0,5	1.1
1,044	ТЭН-75А10/2.0J220	2,0	9,1	24,2	36		—	50	350	—	20	0,6	1.6

119

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,045	ТЭН-78А10/2.0J220	2	9,1	24,2	383		–	43	367	–	17	0,6	1.1
1,046	ТЭН-85А10/2.0P220	2	9,1	24,2	414		–	55	398	–	23	0,6	1.1
1,047	ТЭН-42А13/2.0P220	2	9,1	24,2	199		–	60	179	–	24	0,3	1.1
1,049	ТЭН-42А13/2.0P220	2	9,1	24,2	198		–	65	178	–	26	0,3	1.1
1,050	ТЭН-42А13/2.0P220	2	9,1	24,2	197		–	70	177	–	29	0,3	1.1
1,051	ТЭН-45А13/2.0P220	2	9,1	24,2	213		–	65	193	–	26	0,3	1.1
1,052	ТЭН-50А13/2.0J220	2	9,1	24,2	239		–	60	219	–	24	0,4	1.1
1,053	ТЭН-50А13/2.0P220	2	9,1	24,2	238		–	65	218	–	26	0,3	1.1
1,054	ТЭН-50А13/2.0P220	2	9,1	24,2	237		–	70	217	–	29	0,3	1.1
1,055	ТЭН-50А13/2.0J220	2	9,1	24,2	288		–	65	266	–	26	0,4	1.1
1,056	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	294		–	45	274	–	16	0,4	1.1
1,057	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	292		–	50	272	–	19	0,4	1.1
1,058	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	291		–	55	271	–	21	0,4	1.1
1,059	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	280		–	60	269	–	24	0,4	1.1
1,060	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	288		–	65	268	–	26	0,4	1.1
1,061	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	287		–	70	267	–	29	0,4	1.1
1,062	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	284		–	80	264	–	34	0,4	1.1
1,063	ТЭН-60А13/2.0P220	2	9,1	24,2	278		–	100	258	–	44	0,4	1.1

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,064	ТЭН-60В13/2.0J220	2	9,1	24,2	289		–	63	269	–	25	0,4	1.1
1,065	ТЭН-65А13/2.0P220	2	9,1	24,2	313		–	65	293	–	26	0,4	1.1
1,066	ТЭН-65А13/2.0P220	2	9,1	24,2	310		–	75	290	–	31	0,4	1.1
1,067	ТЭН-66А13/2.0P220	2	9,1	24,2	317		–	70	297	–	29	0,5	1.1
1,068	ТЭН-70А13/2.0P220	2	9,1	24,2	337		–	70	317	–	29	0,5	1.1
1,069	ТЭН-80А13/2.0J220	2	9,1	24,2	387		–	70	367	–	29	0,6	1.1
1,070	ТЭН-80А13/2.0J220	2	9,1	24,2	381		–	90	361	–	39	0,6	1.1
1,071	ТЭН-80А13/2.0P220	2	9,1	24,2	392		–	50	372	–	19	0,5	1.1
1,072	ТЭН-80А13/2.0P220	2	9,1	24,2	389		–	60	369	–	24	0,5	1.1
1,073	ТЭН-80А13/2.0P220	2	9,1	24,2	388		–	65	368	–	26	0,5	1.1
1,074	ТЭН-80А13/2.0P220	2	9,1	24,2	387		–	70	367	–	29	0,5	1.1
1,075	ТЭН-90В13/2.0P220	2	9,1	24,2	387		–	70	367	–	29	0,5	1.1
1,076	ТЭН-85А13/2.0J220	2	9,1	24,2	410		–	73	390	–	30	0,6	1.1
1,077	ТЭН-85А13/2.0P220	2	9,1	24,2	412		–	70	392	–	29	0,6	1.1
1,078	ТЭН-85А13/2.0P220	2	9,1	24,2	411		–	73	391	–	30	0,6	1.1
1,079	ТЭН-90А13/2.0P220	2	9,1	24,2	441		–	55	421	–	21	0,6	1.1
1,080	ТЭН-100А13/2.0J220	2	9,1	24,2	479		–	95	459	–	41	0,7	1.1
1,081	ТЭН-100А13/2.0J220	2	9,1	24,2	475		–	11	455	–	49	0,7	1.1

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,082	ТЭН-100А13/2.0P220	2	9,1	24,2	492		–	50	472	–	19	0,7	1.1
1,083	ТЭН-100А13/2.0P220	2	9,1	24,2	488		–	65	468	–	26	0,7	1.1
1,084	ТЭН-100А13/2.0P220	2	9,1	24,2	287		–	70	467	–	29	0,7	1.1
1,085	ТЭН-100А13/2.0P220	2	9,1	24,2	484		–	80	464	–	34	0,7	1.1
1,086	ТЭН-110А13/2.0P220	2	9,1	24,2	514		–	150	494	–	69	0,8	1.1
1,087	ТЭН-120А13/2.0P220	2	9,1	24,2	587		–	70	567	–	29	0,8	1.1
1,088	ТЭН-140А13/2.0P220	2	9,1	24,2	688		–	65	668	–	26	1	1.1
1,089	ТЭН-140А13/2.0P220	2	9,1	24,2	687		–	70	667	–	29	1	1.1
1,090	ТЭН-165А13/2.0J220	2	9,1	24,2	813		–	65	793	–	26	1,2	1.1
1,092	ТЭН-100А13/2.0J220	2	9,1	24,2	232		184	120	212	20	54	0,7	1.3; 1.4
1,093	ТЭН-140В13/2.0P380	2	5,3	71,7	352		312	65	332	20	26	1	1.3; 1.4
1,094	ТЭН-58А13/2.0P220	2	9,1	24,2	160		102	50	140	–	25	0,4	1.5
1,096	ТЭН-65А10/2.2J220	2,2	10	22	320		–	35	300	–	13	0,5	1.1
1,097	ТЭН-45А13/2.2P220	2,2	10	22	216		–	55	196	–	21	0,3	1.1
1,098	ТЭН-80А13/2.2P220	2,2	10	22	262	82	150	80	50	–	34	0,5	1.8
1,099	ТЭН-100А8/2.5J220	2,5	11	20	497		–	25	480	–	9	0,7	1.1
1,100	ТЭН-50А13/2.5P220	2,5	11	20	240		–	60	220	–	24	0,3	1.1
1,101	ТЭН-60А13/2.5J220	2,5	11	20	288		–	65	268	–	26	0,4	1.1
1,102	ТЭН-60А13/2.5P220	2,5	11	20	288		–	65	268	–	26	0,4	1.1
1,103	ТЭН-71А13/2.5P220	2,5	11	20	339		–	80	319	–	34	0,5	1.1
1,104	ТЭН-80А13/2.5J220	2,5	11	20	388		–	65	368	–	26	0,5	1.1

122

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,105	ТЭН-80А13/2.5P220	2,5	11	20	384		–	80	364	–	34	0,5	1.1
1,106	ТЭН-80А13/2.5P220	2,5	11	20	378		–	100	358	–	44	0,5	1.1
1,107	ТЭН-80В13/2.5P220	2,5	11	20	388		–	65	368	–	26	0,5	1.1
1,108	ТЭН-100А13/2.5P220	2,5	11	20	487		–	70	467	–	29	0,7	1.1
1,109	ТЭН-160А13/2.5J220	2,5	11	20	778		–	100	758	–	44	1,2	1.1
1,110	ТЭН-58А13/2.5P220	2,5	11	20	160		102	50	140	–	25	0,4	1.5
1,111	ТЭН-70В13/2.5P220	2,5	11	20	170		96	120	150	–	54	0,5	1.5
1,112	ТЭН-78А13/2.5P220	2,5	11	20	190		142	50	170	–	25	0,5	1.5
1,113	ТЭН-78В7А13/2.6J220	2,5	11	20	128	13	164	50	108	–	19	0,6	1.6
1,114	ТЭН-75А13/2.75P220	2,75	13	16,9	362	5	–	70	342	–	29	0,5	1.1
1,115	ТЭН-160А10/3.0P220	3	14	15,7	776		–	80	762	–	35	1,1	1.1
1,116	ТЭН-60А13/3.0J380	3	7,9	48,1	293		–	47	273	–	17	0,4	1.1
1,117	ТЭН-60А13/3.0P220	3	14	15,7	289		–	60	269	–	24	0,4	1.1
1,118	ТЭН-60А13/3.0P220	3	14	15,7	288		–	65	268	–	26	0,4	1.1
1,119	ТЭН-70А13/3.0P220	3	14	15,7	337		–	70	317	–	29	0,5	1.1
1,120	ТЭН-71А13/3.0J220	3	14	15,7	333		–	100	313	–	44	0,5	1.1
1,121	ТЭН-80А13/3.0J220	3	14	15,7	392		–	50	372	–	19	0,6	1.1

123

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,122	ТЭН-80А13/3.0P220	3	14	15,7	388	13	–	65	368	–	26	0,5	1.1
1,123	ТЭН-80А13/3.0P220	3	14	15,7	387	5	–	70	367	–	29	0,5	1.1
1,124	ТЭН-80А13/3.0P220	3	14	15,7	384	82	–	80	364	–	34	0,5	1.1
1,125	ТЭН-80В13/3.0P220	3	14	15,7	387	–	–	70	367	–	29	0,5	1.1
1,126	ТЭН-82А13/3.0P220	3	14	15,7	398	–	–	65	378	–	26	0,6	1.1
1,127	ТЭН-90А13/3.0J220	3	14	15,7	437	–	–	67	417	–	27	0,7	1.1
1,128	ТЭН-90В13/3.0J220	3	14	15,7	439	–	–	60	419	–	24	0,7	1.1
1,129	ТЭН-95А13/3.0J220	3	14	15,7	462	–	–	70	442	–	29	0,7	1.1
1,130	ТЭН-100А13/3.0J220	3	14	15,7	493	–	–	47	473	–	17	0,7	1.1
1,131	ТЭН-100А13/3.0J220	3	14	15,7	488	–	–	65	468	–	26	0,7	1.1
1,132	ТЭН-100А13/3.0J220	3	14	15,7	484	–	–	80	464	–	34	0,7	1.1
1,133	ТЭН-100А13/3.0P220	3	14	15,7	503	–	–	47	483	–	17	0,7	1.1
1,134	ТЭН-100А13/3.0P220	3	14	15,7	487	–	–	70	467	–	29	0,7	1.1
1,135	ТЭН-100А13/3.0P220	3	14	15,7	471	–	–	90	451	–	39	0,7	1.1
1,136	ТЭН-110F13/3.0P220	3	14	15,7	537	–	–	70	517	–	29	0,8	1.1
1,137	ТЭН-120А13/3.0J220	3	14	15,7	587	–	–	70	567	–	29	0,9	1.1
1,138	ТЭН-120А13/3.0P220	3	14	15,7	584	82	–	80	564	–	34	0,8	1.1
1,139	ТЭН-120А13/3.0P220	3	14	15,7	572	82	–	120	552	–	54	0,8	1.1
1,140	ТЭН-140А13/3.0P220	3	14	15,7	687	–	–	70	667	–	29	1	1.1
1,141	ТЭН-160А13/3.0J220	3	14	15,7	792	–	–	50	772	–	19	1,2	1.1

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,142	ТЭН-210А13/3.0P380	3	7,9	48,1	1036	–	–	71	1016	–	29	1,4	1.1
1,144	ТЭН-100А13/3.0J220	3	14	15,7	240	–	211	80	220	20	34	0,7	1.3; 1.4
1,145	ТЭН-78А13/3.0P220	3	14	15,7	128	–	164	50	108	–	19	0,5	1.6
1,146	ТЭН-80А13/3.0P220	3	14	15,7	262	–	150	80	50	–	34	0,5	1.6
1,147	ТЭН-90А10/3.15J220	3,15	14	15,7	431	–	–	70	415	–	30	0,7	1.1
1,148	ТЭН-60В13/3.15P220	3,15	14	15,7	294	–	–	45	274	–	16	0,4	1.1
1,149	ТЭН-70А13/3.15P220	3,15	14	15,7	341	–	–	55	321	–	21	0,5	1.1
1,150	ТЭН-80А13/3.15P220	3,15	14	15,7	388	–	–	65	368	–	26	0,5	1.1
1,151	ТЭН-80А13/3.15P220	3,15	14	15,7	387	–	–	70	367	–	29	0,5	1.1
1,152	ТЭН-82А13/3.15J220	3,15	14	15,7	396	–	–	73	376	–	30	0,6	1.1
1,153	ТЭН-82А13/3.15P220	3,15	14	15,7	398	–	–	65	378	–	26	0,6	1.1
1,154	ТЭН-82А13/3.15P220	3,15	14	15,7	397	–	–	70	377	–	29	0,6	1.1
1,155	ТЭН-85А13/3.15P220	3,15	14	15,7	412	–	–	70	392	–	29	0,6	1.1
1,156	ТЭН-90А13/3.15P220	3,15	14	15,7	435	–	–	75	415	–	31	0,6	1.1
1,157	ТЭН-90А13/3.15P220	3,15	14	15,7	431	–	–	90	411	–	39	0,6	1.1
1,158	ТЭН-100А13/3.15P220	3,15	14	15,7	486	–	–	65	468	–	26	0,7	1.1
1,159	ТЭН-100А13/3.15P220	3,15	14	15,7	486	–	–	73	466	–	30	0,7	1.1
1,160	ТЭН-80А13/3.15J220	3,15	14	15,7	262	–	150	80	50	–	34	0,6	1.8
1,161	ТЭН-80А13/3.15P220	3,15	14	15,7	262	–	150	80	50	–	34	0,5	1.8

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,162	ТЭН-70А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	337	–	70	317	–	29	0,5	1.1	
1,163	ТЭН-80А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	387	–	70	367	–	29	0,5	1.1	
1,164	ТЭН-97А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	473	–	65	453	–	26	0,7	1.1	
1,165	ТЭН-100А13/3.5J220	3,5	16	13,8	489	–	63	469	–	25	0,7	1.1	
1,166	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	487	–	70	467	–	29	0,7	1.1	
1,167	ТЭН-100В13/3.5J220	3,5	16	13,8	487	–	70	467	–	29	0,7	1.1	
1,168	ТЭН-136В 13/3.5J220	3,5	16	13,8	672	–	52	652	–	20	1	1.1	
1,169	ТЭН-140В13/3.5Р220	3,5	16	13,8	684	–	80	664	–	34	1	1.1	
1,170	ТЭН-145А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	709	–	80	689	–	34	1	1.1	
1,172	ТЭН-90А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	222	153	110	202	20	49	0,6	1.3; 1.4	
1,173	ТЭН-100А13/3.5J220	3,5	16	13,8	230	167	120	210	20	54	0,7	1.3; 1.4	
1,174	ТЭН-100А13/3.5J220	3,5	16	13,8	240	194	100	220	20	44	0,7	1.3; 1.4	
1,175	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	230	187	120	210	20	54	0,7	1.3; 1.4	
1,176	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	240	194	100	220	20	44	0,7	1.3; 1.4	
1,178	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	230	187	120	210	20	54	0,7	1.3; 1.4	
1,179	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	300	134	100	280	20	44	0,7	1.3; 1.4	
1,181	ТЭН-100В13/3.5Р220	3,5	16	13,8	230	183	125	210	20	56	0,7	1.3; 1.4	
1,182	ТЭН-100В13/3.5Р220	3,5	16	13,8	245	215	70	235	20	29	0,7	1.3; 1.4	
1,183	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	321	–	100	301	20	44	0,7	1.7	
1,184	ТЭН-100А13/3.5Р220	3,5	16	13,8	289	–	117	269	20	52	0,7	1.7	

126

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,185	ТЭН-80А13/4.0Р220	4	18	12,2	387	–	70	367	–	29	0,5	1.1	
1,186	ТЭН-85А13/4.0Р220	4	18	12,2	409	–	80	389	–	34	0,6	1.1	
1,187	ТЭН-90А13/4.0Р220	4	18	12,2	434	–	80	414	–	34	0,6	1.1	
1,188	ТЭН-100А13/4.0Р220	4	18	12,2	487	–	70	467	–	29	0,7	1.1	
1,189	ТЭН-100А13/4.0Р220	4	18	12,2	484	–	80	464	–	34	0,7	1.1	
1,190	ТЭН-100А13/4.0Р220	4	18	12,2	481	–	90	461	–	39	0,7	1.1	
1,191	ТЭН-110В13/4.0J220	4	18	12,2	539	–	63	519	–	25	0,8	1.1	
1,192	ТЭН-115В13/4.0ШО	4	18	12,2	553	–	100	533	–	44	0,8	1.1	
1,193	ТЭН-120В13/4.0Р220	4	18	12,2	586	–	73	566	–	30	0,8	1.1	
1,194	ТЭН-100А13/4.0Р220	4	18	12,2	240	194	100	220	20	44	0,7	1.3; 1.4	
1,195	ТЭН-120А13/4.0J220	4	18	12,2	340	235	75	320	20	31	0,9	1.3; 1.4	
1,196	ТЭН-120А13/4.0Р220	4	18	12,2	340	235	75	320	20	31	0,8	1.3; 1.4	
1,197	ТЭН-90А13/5.0Р220	5	23	9,57	428	–	100	408	–	44	0,6	1.1	
1,198	ТЭН-100А13/5.0Р220	5	23	9,57	489	–	60	469	–	24	0,7	1.1	
1,199	ТЭН-100А13/5.0Р220	5	23	9,57	487	–	70	467	–	29	0,7	1.1	
1,200	ТЭН-100А13/5.0Р220	5	23	9,57	482	–	85	462	–	36	0,7	1.1	
1,201	ТЭН-115В13/5.0J220	5	23	9,57	553	–	100	533	–	44	0,8	1.1	
1,202	ТЭН-130В13/5.0J220	5	23	9,57	637	–	70	617	–	29	1	1.1	
1,203	ТЭН-135В13/5.0J220	5	23	9,57	664	–	63	644	–	25	1	1.1	

127

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
1,204	ТЭН-170А13/5.0P220	5	23	9,57	831	—	—	90	811	—	39	1,2	1.1
1,205	ТЭН-200А13/5.0J220	5	23	9,57	987	—	—	70	967	—	29	1,5	1.1
1,206	ТЭН-200А13/5.0P220	5	23	9,57	987	—	—	70	967	—	29	1,4	1.1
1,207	ТЭН-270В13/5.0P220	5	23	9,57	1319	—	—	130	1299	—	59	1,8	1.1
1,208	ТЭН-140В10/5.0J220	5	23	9,57	354	—	305	65	334	15	28	1	1.3; 1.4
1,209	ТЭН-100А13/5.0J220	5	23	9,57	360	—	107	60	340	20	24	0,7	1.3; 1.4
1,210	ТЭН-100А13/5.0P220	5	23	9,57	270	—	200	60	250	20	24	0,7	1.3; 1.4
1,211	ТЭН-100А13/5.0P220	5	23	9,57	270	—	194	65	250	20	26	0,7	1.3; 1.4
1,212	ТЭН-120А13/5.0J220	5	23	9,57	380	—	244	65	300	20	26	0,9	1.3; 1.4
1,213	ТЭН-120А13/5.0P220	5	23	9,57	320	—	244	65	300	20	26	0,8	1.3; 1.4
1,214	ТЭН-140А13/5.0P220	5	23	9,57	370	—	300	80	350	20	34	1	1.3; 1.4
1,215	ТЭН-140В13/5.0J220	5	23	9,57	350	—	314	65	330	20	26	1	1.3; 1.4
1,216	ТЭН-140В13/5.0P220	5	23	9,57	330	—	287	120	310	20	54	1	1.3; 1.4
1,217	ТЭН-140В13/5.0P220	5	23	9,57	350	—	314	65	330	20	26	1	1.3; 1.4
1,218	ТЭН-140В13/5.0P220	5	23	9,57	350	—	310	70	330	20	29	1	1.3; 1.4
1,220	ТЭН-140В13/5.0P220	5	23	9,57	370	—	294	70	350	20	29	1	1.3; 1.4
1,221	ТЭН-140А13/5.0P220	5	23	9,57	558	—	—	80	538	20	34	1	1.7
1,222	ТЭН-140А13/5.0P220	5	23	9,57	489	—	—	117	469	20	52	1	1.7
1,223	ТЭН-120А13/6.0P220	6	27	8,15	587	—	—	70	567	—	29	0,8	1.1
1,224	ТЭН-200В13/6.0P220	6	27	8,15	978	—	—	100	958	—	44	1,4	1.1
1,225	ТЭН-265А13/10.0J380	10	26	14,5	700	—	—	63	680	29	25	1,8	1.3; 1.4

П.1.2. ТЭНы для нагрева спокойного воздуха и газов

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
2,001	ТЭН-75А13/0.25S110	0,25	2,27	48,4	138	120	120	92	100	—	25	0,37	2.5
2,002	ТЭН-52А13/0.4S220	0,4	1,8	122	520	—	—	—	—	—	—	0,35	2.1
2,003	ТЭН-60А13/0.4S220	0,4	1,8	122	287	—	—	70	—	—	29	0,41	2.2
2,004	ТЭН-170А13/0.4S220	0,4	1,8	122	634	—	—	60	—	—	34	1,16	2.2
2,005	ТЭН-60А13/0.5S220	0,5	2,3	95,7	295	—	—	40	—	—	14	0,41	2.2
2,006	ТЭН-116А8/0.6T220	0,6	2,7	81,5	540	—	—	118	—	—	55	0,85	2.2
2,007	ТЭН-80А13/0.63S220	0,63	2,9	75,9	800	—	—	—	—	—	—	0,54	2.1
2,008	ТЭН-85А13/0.63S220	0,63	2,9	75,9	413	—	—	65	—	—	26	0,58	2.2
2,009	ТЭН-90А13/0.65S220	0,65	3	75,3	438	—	—	65	—	—	26	0,61	2.2
2,010	ТЭН-100А13/0.8S220	0,8	3,6	61,1	487	—	—	70	—	—	29	0,68	2.2
2,011	ТЭН-100А13/0.8S220	0,8	3,6	61,1	484	—	—	80	—	—	34	0,68	2.2
2,012	ТЭН-130А13/0.8S220	0,8	3,6	61,1	634	—	—	60	—	—	34	0,88	2.2
2,013	ТЭН-140А13/0.8S220	0,8	3,6	61,1	678	—	—	100	—	—	44	0,95	2.2
2,014	ТЭН-100А13/1.0S220	1	4,5	46,9	1000	—	—	—	—	—	—	0,68	2.1
2,015	ТЭН-120А13/1.0S220	1	4,5	48,9	1200	—	—	—	—	—	—	0,82	2.1
2,016	ТЭН-120А13/1.0T220	1	4,5	48,9	1200	—	—	—	—	—	—	0,88	2.1
2,017	ТЭН-200А13/1.0S220	1	4,5	48,9	2000	—	—	—	—	—	—	1,36	2.1
2,018	ТЭН-45А10/1.0T220	1	4,5	48,9	220	—	—	35	—	—	13	0,33	2.2
2,019	ТЭН-60А13/1.0T220	1	4,5	48,9	289	—	—	60	—	—	24	0,44	2.2

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
2,020	ТЭН-120А13/1.0S220	1	4,5	48,9	589	-	-	60	-	-	24	0,82	2.2
2,021	ТЭН-120А13/1.0S220	1	4,5	48,9	587	-	-	70	-	-	29	0,82	2.2
2,022	ТЭН-120А13/1.0S220	1	4,5	48,9	584	-	-	80	-	-	34	0,82	2.2
2,023	ТЭН-120А13/1.0S220	1	4,5	48,9	549	-	-	200	-	-	94	0,82	2.2
2,024	ТЭН-120В13/1.0S220	1	4,5	48,9	587	-	-	70	-	-	29	0,82	2.2
2,025	ТЭН-125А13/1.0S220	1	4,5	48,9	614	-	-	60	-	-	24	0,85	2.2
2,026	ТЭН-140А13/1.1S220	1,1	5	44	587	-	-	70	-	-	29	0,95	2.2
2,027	ТЭН-80А13/1.2Т220	1,2	5,5	40	389	-	-	60	-	-	24	0,58	2.2
2,028	ТЭН-170А13/1.4S220	1,4	6,4	34,4	834	-	-	80	-	-	34	1,16	2.2
2,029	ТЭН-80А13/1.5Т220	1,5	6,8	32,4	800	-	-	-	-	-	-	0,58	2.1
2,030	ТЭН-180А13/1.5S220	1,5	6,8	32,4	1800	-	-	-	-	-	-	1,22	2.1
2,031	ТЭН-200А13/1.5S220	1,5	6,8	32,4	2000	-	-	-	-	-	-	1,36	2.1
2,032	ТЭН-320А13/1.5S220	1,5	6,8	32,4	3200	-	-	-	-	-	-	2,18	2.1
2,033	ТЭН-200А13/1.5S220	1,5	6,8	32,4	984	-	-	80	-	-	34	1,36	2.2
2,034	ТЭН-100А13/1.6Т220	1,6	7,3	30,1	1000	-	-	-	-	-	-	0,73	2.1
2,035	ТЭН-100А13/1.6Т220	1,6	7,3	30,1	492	-	-	50	-	-	19	0,73	2.2
2,036	ТЭН-100А13/1.6Т220	1,6	7,3	30,1	478	-	-	100	-	-	44	0,73	2.2
2,037	ТЭН-120А13/1.6Т220	1,6	7,3	30,1	587	-	-	70	-	-	29	0,88	2.2
2,038	ТЭН-200А13/1.6S220	1,6	7,3	30,1	984	-	-	80	-	-	34	1,36	2.2
2,039	ТЭН-240А13/2.0S220	2	9,1	24,2	2400	-	-	-	-	-	-	1,63	2.1
2,040	ТЭН-160А8/2.0Т220	2	9,1	24,2	881	-	-	80	-	-	36	1,31	2.2
2,041	ТЭН-340А10/2.0Т220	2	9,1	24,2	1685	-	-	70	-	-	30	2,48	2.2
2,042	ТЭН-120А13/2.0Т220	2	9,1	24,2	592	-	-	50	-	-	19	0,88	2.2

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
2,043	ТЭН-120В13/2.0Т220	2	9,1	24,2	592	-	-	50	-	-	19	0,88	2.2
2,044	ТЭН-120В13/2.0Т220	2	9,1	24,2	584	-	-	80	-	-	34	0,88	2.2
2,045	ТЭН-130А13/2.0Т220	2	9,1	24,2	634	-	-	80	-	-	34	0,95	2.2
2,046	ТЭН-140А13/2.0Т220	2	9,1	24,2	687	-	-	70	-	-	29	1,02	2.2
2,047	ТЭН-140А13/2.0Т220	2	9,1	24,2	684	-	-	80	-	-	34	1,02	2.2
2,048	ТЭН-200В13/2.0Т220	2	9,1	24,2	984	-	-	80	-	-	34	1,46	2.2
2,049	ТЭН-240А13/2.0S220	2	9,1	24,2	1187	-	-	67	-	-	27	1,63	2.2
2,050	ТЭН-280F13/2.0S220	2	9,1	24,2	1378	-	-	100	-	-	44	1,9	2.2
2,051	ТЭН-300А13/2.5S220	2,5	11	20	3000	-	-	-	-	-	-	2,04	2.1
2,052	ТЭН-210А10/2.5Т220	2,5	11	20	1035	-	-	70	-	-	30	1,53	2.2
2,053	ТЭН-140В13/2.5Т220	2,5	11	20	678	-	-	100	-	-	44	1,02	2.2
2,054	ТЭН-350А13/3.0S220	3	14	15,7	3500	-	-	-	-	-	-	2,38	2.1
2,055	ТЭН-200А13/3.5Т220	3,5	16	13,8	978	-	-	100	-	-	44	1,46	2.2
2,056	ТЭН-209А13/3.5Т220	3,5	16	13,8	1030	-	-	75	-	-	31	1,53	2.2

П.1.3. ТЭНы для нагрева движущегося воздуха и газов

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус гйба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
2,201	ТЭН-33А13/0.32О110	0,32	2,9	37,9	150	-	-	75	-	-	31	0,24	2.2
2,202	ТЭН-46А13/0.5О110	0,5	4,5	24,4	480	-	-	-	-	-	-	0,35	2.1
2,203	ТЭН-162А13/0.55О220	0,55	2,5	88	788	-	-	100	-	-	44	1,18	2.2
2,204	ТЭН-45А10/0.8О110	0,8	7,3	15,1	450	-	-	-	-	-	-	0,33	2.1
2,205	ТЭН-45А10/0.8О110	0,8	7,3	15,1	450	-	-	-	-	-	-	0,33	2.1
2,206	ТЭН-80А13/1.0О220	1	4,5	48,9	800	-	-	-	-	-	-	0,58	2.1
2,207	ТЭН-70А13/1.0О220	1	4,5	48,9	337	-	-	70	-	-	29	0,51	2.2
2,208	ТЭН-80А13/1.0О220	1	4,5	48,9	384	-	-	80	-	-	34	0,58	2.2
2,209	ТЭН-80А13/1.5О220	1,5	6,8	32,4	387	-	-	70	-	-	29	0,58	2.2
2,210	ТЭН-90А13/1.5К220	1,5	6,8	32,4	434	-	-	80	-	-	34	0,66	2.2
2,211	ТЭН-170А13/1.6К220	1,6	7,3	30,1	839	-	-	63	-	-	25	1,24	2.2
2,212	ТЭН-140А13/2.0О220	2	9,1	24,2	684	-	-	80	-	-	34	1,02	2.2
2,213	ТЭН-200D13/2.5О220	2,5	11	20	986	-	-	73	-	-	30	1,46	2.2
2,214	ТЭН-240В13/3.15О220	3,15	14	15,7	1167	-	-	70	-	-	29	1,75	2.2
2,215	ТЭН-140А13/3.5К380	3,5	9,2	41,3	687	-	-	70	-	-	29	1,02	2.2
2,216	ТЭН-610А13/6.0N220	6,00	27,0	8,2	3039	-	-	64	-	-	25,5	4,20	1.1

132

П.1.4. Оребренные ТЭНы

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус гйба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
2,301	ТЭН-54А13/0.5Op220	0,50	2,3	95,7	600	33	-	-	-	-	-	0,37	3.1
2,302	ТЭН-53В13/0.54Op110	0,54	4,9	22,4	282	-	103	70	-	-	29	0,36	3.2
2,303	ТЭН-60В13/0.6Kp220	0,60	2,7	81,5	660	29	-	-	-	-	-	0,44	3.1
2,304	ТЭН-60А13/0.63Op220	0,63	2,9	75,9	660	33	-	-	-	-	-	0,41	3.1
2,305	ТЭН-49А13/0.75Op220	0,75	3,4	64,7	550	33	-	-	-	-	-	0,33	3.1
2,306	ТЭН-80В13/0.8Op220	0,80	3,6	61,1	860	33	-	-	-	-	-	0,54	3.1
2,307	ТЭН-30А13/1.0Op220	1,00	4,5	48,9	360	33	-	-	-	-	-	0,2	3.1
2,308	ТЭН-54В13/1.0Op220	1,00	4,5	48,9	600	33	-	-	-	-	-	0,37	3.1
2,309	ТЭН-57В13/1.0Op220	1,00	4,5	48,9	630	33	-	-	-	-	-	0,39	3.1
2,310	ТЭН-60В13/1.0Kp220	1,00	4,5	48,9	660	29	-	-	-	-	-	0,44	3.1
2,311	ТЭН-78А13/1.0Op220	1,00	4,5	48,9	840	33	-	-	-	-	-	0,53	3.1
2,312	ТЭН-78А13/1.0Op380	1,00	2,6	146	840	33	-	-	-	-	-	0,53	3.1
2,313	ТЭН-75В13/1.0Op220	1,00	4,5	48,9	386	-	123	90	-	-	39	0,51	3.2
2,314	ТЭН-120В13/1.0Op220	1,00	4,5	48,9	611	-	123	90	-	-	39	0,82	3.2
2,315	ТЭН-60А10/1.2Kp220	1,20	5,5	40	640	26	-	-	-	-	-	0,44	3.1
2,316	ТЭН-60А13/1.25Op220	1,25	5,7	38,6	660	33	-	-	-	-	-	0,41	3.1
2,317	ТЭН-65А13/1.25Op220	1,25	5,7	38,6	710	33	-	-	-	-	-	0,44	3.1
2,318	ТЭН-50А13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	560	33	-	-	-	-	-	0,34	3.1
2,319	ТЭН-52А13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	580	33	-	-	-	-	-	0,35	3.1
2,320	ТЭН-52В13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	580	33	-	-	-	-	-	0,35	3.1
2,321	ТЭН-53А13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	590	33	-	-	-	-	-	0,36	3.1

133

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
					А	Б	В	Г	Д	Е			
2,322	ТЭН-80А13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	860	33	—	—	—	—	—	0,54	3.1
2,323	ТЭН-83В13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	890	33	—	—	—	—	—	0,56	3.1
2,324	ТЭН-90В13/1.5Op220	1,50	6,8	32,4	960	33	—	—	—	—	—	0,61	3.1
2,325	ТЭН-75А13/1.75Op220	1,75	8	27,5	389	—	113	80	—	—	34	0,51	3.2
2,326	ТЭН-50В13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	560	33	—	—	—	—	—	0,34	3.1
2,327	ТЭН-52А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	580	33	—	—	—	—	—	0,35	3.1
2,328	ТЭН-52А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	580	33	—	—	—	—	—	0,35	3.1
2,329	ТЭН-53А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	590	33	—	—	—	—	—	0,36	3.1
2,330	ТЭН-54А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	600	33	—	—	—	—	—	0,37	3.1
2,331	ТЭН-55А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	610	33	—	—	—	—	—	0,37	3.1
2,332	ТЭН-60А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	660	33	—	—	—	—	—	0,41	3.1
2,333	ТЭН-70В13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	760	33	—	—	—	—	—	0,48	3.1
2,334	ТЭН-75В13/2.0Op380	2,00	5,3	71,7	810	33	—	—	—	—	—	0,51	3.1
2,335	ТЭН-79Е13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	850	33	—	—	—	—	—	0,54	3.1
2,336	ТЭН-84В13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	900	33	—	—	—	—	—	0,57	3.1
2,337	ТЭН-94В13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	1000	33	—	—	—	—	—	0,64	3.1
2,338	ТЭН-230А13/2.0Op220	2,00	9,1	24,2	1158	—	133	100	—	—	44	1,56	3.2
2,339	ТЭН-54А13/2.2Op220	2,20	10	22	600	33	—	—	—	—	—	0,37	3.1
2,343	ТЭН-60А13/2.5Op220	2,50	11	20	660	33	—	—	—	—	—	0,41	3.1
2,344	ТЭН-65В13/2.5Op220	2,50	11	20	710	33	—	—	—	—	—	0,44	3.1
2,345	ТЭН-78А13/3.0Op220	3,00	14	15,7	398	—	133	100	—	—	44	0,53	3.2
2,346	ТЭН-108А13/4.5Op220	5,00	23	9,57	1140	33	—	—	—	—	—	0,73	3.1

134

П.1.5. ТЭНы для нагрева жиров и масел

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Удельная поверхностная мощность, Вт/см ²	Размеры, мм						Радиус ггиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
						А	Б	В	Г	Д	Е			
3,001	ТЭН-50А10/0.3Z110	0,3	2,7	40,7	2,27	244	—	—	40	—	—	15	0,34	2.2
3,002	ТЭН-52А10/0.4Z220	0,4	1,8	122	2,9	250	—	—	40	234	—	15	0,35	1.1
3,003	ТЭН-70А13/1.0Z220	1	4,5	48,9	3,95	337	—	—	70	317	—	29	0,48	1.1
3,004	ТЭН-110А13/1.2Z220	1,2	5,5	40	2,88	526	—	—	100	508	—	44	0,75	1.1
3,005	ТЭН-140А13/1.5Z220	1,5	6,8	32,4	2,78	684	—	—	80	664	—	34	0,95	1.1
3,006	ТЭН-145В13/1.5Z220	1,5	6,8	32,4	2,78	716	—	—	55	—	—	21	0,99	2.2
3,007	ТЭН-180А13/2.0Z220	2	9,1	24,2	2,85	892	—	—	50	—	—	19	1,22	2.2
3,008	ТЭН-250А13/2.15Z220	2,15	9,8	22,4	2,18	700	—	620	70	680	20	29	1,7	1.4
3,009	ТЭН-200А13/2.3Z220	2,3	10	22	2,93	978	—	—	100	—	—	44	1,36	2.2
3,010	ТЭН-250В13/2.5Z220	2,5	11	20	2,58	1235	—	—	75	1215	—	31	1,7	1.1
3,011	ТЭН-250А13/3.0Z220	3	14	15,7	3,04	678	—	642	70	658	20	29	1,7	1.4
3,012	ТЭН-265А13/3.15Z380	3,15	8,3	45,8	3	1317	—	—	50	1297	—	19	1,6	1.1

135

П.1.6. ТЭНы для нагрева литейных форм и пресс-форм

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Удельная поверхностная мощность, Вт/см ²	Размеры, мм					Радиусгиба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)
						А	Б	В	Г	Д			
4,001	ТЭН-100А13/1.6L220	1,6	7,3	30,1	4,26	1000	-	-	-	-	-	0,68	2.1
4,002	ТЭН-16.5А13/0.5L36	0,5	14	2,57	14,4	165	-	-	-	-	-	0,11	2.1
4,003	ТЭН-20А13/0.5L36	0,5	14	2,57	10,2	200	-	-	-	-	-	0,14	2.1
4,004	ТЭН-22А13/0.5L36	0,5	14	2,57	8,75	220	-	-	-	-	-	0,15	2.1
4,005	ТЭН-26А13/1.0L110	1	9,1	12,1	13,6	260	-	-	-	-	-	0,18	2.1
4,006	ТЭН-45А13/0.3L36	0,3	8,3	4,34	1,99	450	-	-	-	-	-	0,31	2.1

136

П.1.7. ТЭНы для бытовых электроприборов

Порядковый номер ТЭНа	Марка ТЭНа	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Номинальное сопротивление, Ом	Удельная поверхностная мощность, Вт/см ²	Номер рис. (П2.)
Самоварные:						
5,001	ТЭН-38-3-10/1.0П220	1,00	4,55	48,4	8,84	4.101; 4.102; 4.103; 4.104
5,002	ТЭН-38-3-10/1.0Р220	1,00	4,55	48,4	8,84	4.101; 4.102; 4.103; 4.104
Для чайников:						
5,003	ТЭН-48-2.5-9.8/1.25Р220	1,25	5,68	38,7	9,1	4.201
5,004	ТЭН-51-3.5-7.4/1.25П220	1,25	5,68	38,7	12,22	4.201
5,005	ТЭН-48-2.5-10/1.25Р220	1,25	5,68	38,7	9,25	4.202
5,006	ТЭН-38-3-10/1.0Р220	1,00	5,68	38,7	8,64	4.203
5,007	ТЭН-53-6-8.5/2.0Х220	2,00	9,09	24,2	20,24	4.204
Для электроплит:						
конфорочные:						
5,008	ТЭН-99-5.5-7.4/1.0Т220	1,00	4,55	48,4	4,89	4.301
5,009	ТЭН-94-3.5-7.4/1.0Т220	1,00	4,55	48,4	5,18	4.302
духовочные:						
5,010	ТЭН-103-3.5-7.4/0.8Т220	0,80	3,64	60,5	3,59	4.501
5,011	ТЭН-120-3.5-7.4/1.2Т220	1,20	5,45	40,3	4,57	4.502
5,012	ТЭН-136-3.5-7.4/1.5Т220	1,50	6,82	32,3	5,16	4.503
5,013	ТЭН-133-3.5-7.4/1.2Т220	1,20	5,45	40,3	4,23	4.504
Для вафельницы						
5,014	ТЭН-39-3-10/0.5У-2 110	0,50	4,55	24,2	4,82	4.401
ТЭНы для электроутюгов:						
5,015	ТЭН-39.8-3-10/1.0У-2 220	1,00	4,55	48,4	9,42	4.601

137

Порядковый номер ТЭНа	Марка оборудования	Марка ТЭНа	Размеры, мм					Радиус гйба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)	
			А	Б	В	Г	Д				Е
6,023	КПЭ-125	ТЭН-79А13/2.67Р220	184			118	164	20	52	0,58	1.7
6,024	КПЭ-160	ТЭН-100А13/3.5Р220	235		182	117	215	20	52	0,85	1.3
6,025	КПЭ-250	ТЭН-140А13/5.0Р220	370		280	80	350	20	33,5	1,0	1.3
6,026	КПЭ-250-1М	ТЭН-140А13/5.0Р220	335		285	117	315	20	52	1,13	1.3
6,027	КЭ-100	ТЭН-85А13/3.15Р220	214			117	194	20	52	0,7	1.7
6,028	КЭ-100М	ТЭН-85А13/3.15Р220	214			117	194	20	52	0,7	1.7
6,029	КЭ-160М	ТЭН-100А13/4.0Р220	270		147	120	250	20	53,5	1,2	1.4
6,030	КЭП-400 (170)	ТЭН-170А13/1.6S220	833		—	84	—	—	35,5	1,2	2.2
6,031	КЭП-400 (140)	ТЭН-140А13/0.8S220	678		—	100	—	—	43,5	1,2	2.2
6,032	ЛПС-17-150	ТЭН-200А13/0.63S220	984		—	64	—	—	30	1,48	2.2
6,033	ММУ-2000	ТЭН-120А13/4.0Р220	370		198	60	350	20	23,5	0,99	1.4
6,034	МСЭ-80	ТЭН-79А13/2.5Р220	381		—	73	361	—	30	0,58	1.1
6,035	МСЭ-80	ТЭН-67А13/2.5Р220	321		—	73	301	—	30	0,5	1.1
6,036	МСЭ-110	ТЭН-79А13/2.5Р220	381		—	73	361	—	30	0,58	1.1
6,037	МСЭ-110	ТЭН-67А13/2.5Р220	321		—	73	301	—	30	0,5	1.1
6,038	МСЭ-110К	ТЭН-70А13/2.5Р220	197		—	350	177	—	30	0,7	1.2
6,039	НЭ-1А	ТЭН-60А13/2.0Р220	294		—	45	274	—	16	0,5	1.1
6,040	ПМК-1Б	ТЭН-100А13/3.5Р220	243		191	100	223	20	43,5	0,76	1.3
6,041	ПШ-1	ТЭН-125Е13/1.25Р220	513		—	270	463	86	40	0,85	1.16
6,042	ПЭСМ-4ШБ	ТЭН-140А13/0.8S220	689		—	64	—	—	25	1,1	2.2
6,043	СЭ-0,22М	ТЭН-140С13/1.25L220	658		—	55	—	—	21	0,96	2.15
6,044	СЭ-0,45М	ТЭН-140С13/1.25L220	658		—	55	—	—	21	0,96	2.15
6,045	ФЭСМ-20	ТЭН-200F13/2.5Z220	550		275	120	500	—	25	1,35	1.17
6,046	ФЭСМ-20	ТЭН-200F13/2.5Z220	500		255	200	450	—	59	1,35	1.17
6,047	ФЭСМ-20	ТЭН-200F13/2.5Z220	475		275	40	425	—	45	1,35	1.17

140

Порядковый номер ТЭНа	Марка оборудования	Марка ТЭНа	Размеры, мм					Радиус гйба, мм	Масса, кг	Номер рис. (П2.)	
			А	Б	В	Г	Д				Е
6,048	ШЖЭ-0,85	ТЭН-240D13/1.0S220	670		—	130	—	—	21	1,72	2.16
6,049	ШЖЭ-0,51	ТЭН-240D13/1.0S220	670		—	130	—	—	21	1,72	2.16
6,050	ШЖЭСМ-2	ТЭН-140А13/0.63S220	688		—	64	—	—	25	0,96	2.2
6,051	ШК-2	ТЭН-237D13/1.25S220	547		—	42	408	—	31	2,0	1.18
6,052	ШК-2	ТЭН-237D13/1.25S220	591		455	150	447	—	55	2,00	1.18
6,053	ШК-2М	ТЭН-170D13/0.63S220	834		544	80	720	—	30	1,25	2.2
6,054	ШПСМ-3	ТЭН-170D13/0.4S220	834		—	80	738	—	30	1,11	2.2
6,055	ЭК-250	ТЭН-140А13/1.0S220	370		—	56	—	—	23	1,2	2.17
6,056	ЭК-60	ТЭН-90А13/2.5Р220	340		302	100	96	—	—	0,64	1.9
6,057	ЭКМ-1	ТЭН-90А13/0.4S220	383		205	256	—	—	121	0,66	2.2
6,058	ЭМ-4	ТЭН-100А13/1.25Р220	420		—	205	400	—	30	0,9	1.2
6,059	ЭМК-1	ТЭН-193А13/1.5Р220	493		—	980	473	—	30	1,5	1.19
6,060	ЭМК-1	ТЭН-80,5А13/1.0Р220	216		—	439	196	—	43	0,66	1.19
6,061	ЭП-2М	ТЭН-158А13/0.56S220	774		—	80	—	—	30	0,94	2.2
6,062	ЭШ-3	ТЭН-182D13/0.45S220	894		—	80	874	—	34	1,37	1.1
6,063	Д-4	ТЭН-58А10/1.8Р220	160		—	50	140	—	25	0,4	1.5
6,064	Д-4	ТЭН-58А10/1.8J220	160		102	50	140	—	25	0,4	1.5
6,065	Д-4	ТЭН-58А13/1.8Х220	160		102	50	140	—	25	0,4	1.5
6,066	Д-4	ТЭН-58А13/1.8Р220	160		102	50	140	—	25	0,4	1.5
6,067	Д-4	ТЭН-58А13/1.8J220	160		102	50	140	—	25	0,4	1.5
6,068	Д-25	ТЭН-72А10/2.0Р220	190		102	50	170	—	25	0,5	1.5
6,069	Д-25	ТЭН-72А10/2.0J220	190		142	50	170	—	25	0,5	1.5
6,070	Д-25	ТЭН-72А13/2.0Х220	190		142	50	170	—	25	0,5	1.5
6,071	Д-25	ТЭН-72А13/2.0Р220	190		142	50	170	—	25	0,5	1.5
6,072	Д-25	ТЭН-72А13/2.0J220	190		142	50	170	—	25	0,5	1.5
6,073	ПЭЛ-100	ТЭН-140В13/6.3Р220	675		142	48	655	—	48	1,1	1.1

141

Приложение 2

ТЭНы Минского завода ТЭНов

Продолжение прил. 2

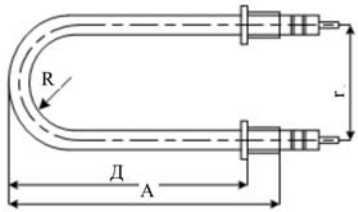


Рисунок 1.1

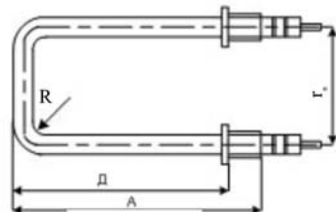


Рисунок 1.2

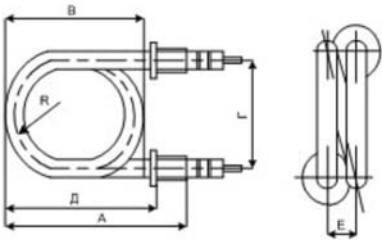


Рисунок 1.3

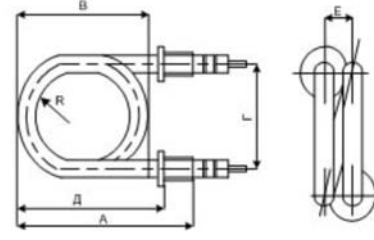


Рисунок 1.4

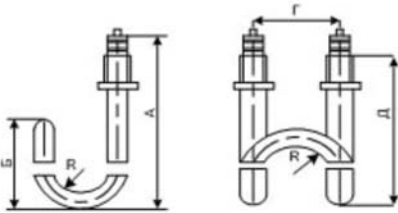


Рисунок 1.5

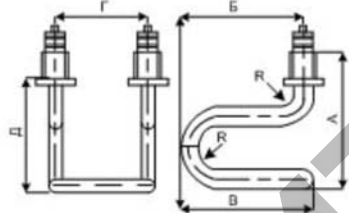


Рисунок 1.6

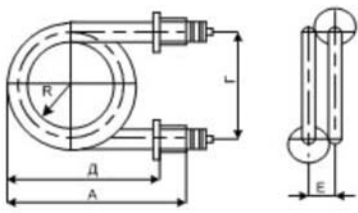


Рисунок 1.7

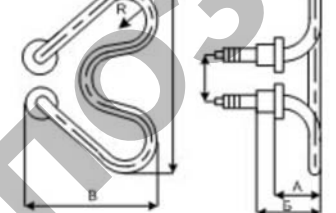


Рисунок 1.8

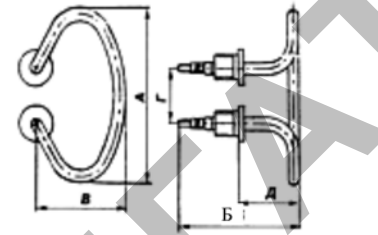


Рисунок 1.9

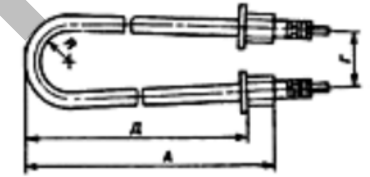


Рисунок 1.10

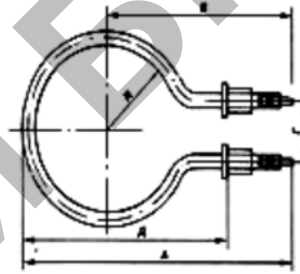


Рисунок 1.12

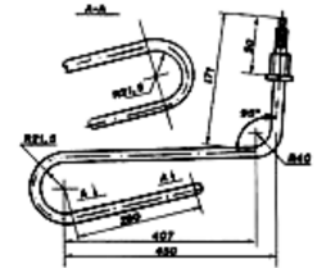


Рисунок 1.13

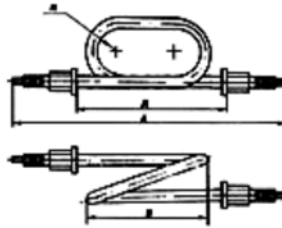


Рисунок 1.14

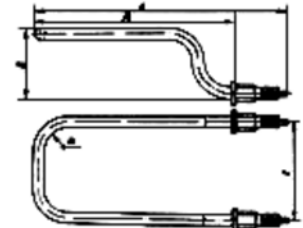


Рисунок 1.16

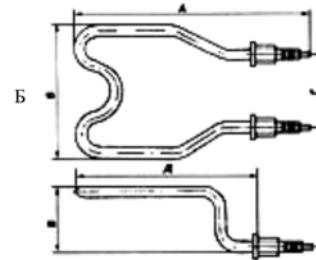


Рисунок 1.17

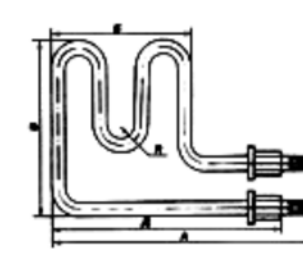


Рисунок 1.18

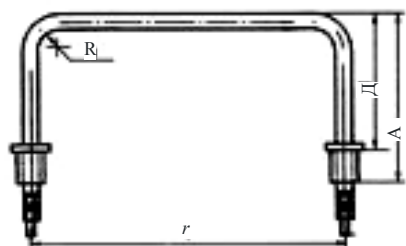


Рисунок 1.19

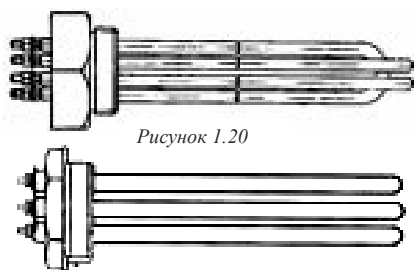


Рисунок 1.20

Рисунок 1.21



Рисунок 2.2

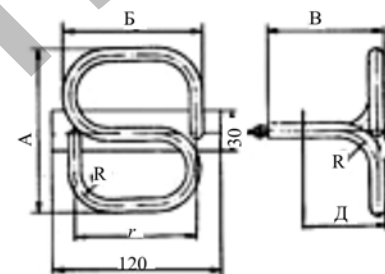


Рисунок 2.5

Рисунки ТЭНов, указанных в приложении 1.2

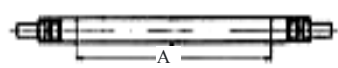


Рисунок 2.1

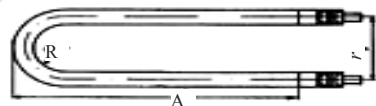


Рисунок 2.15

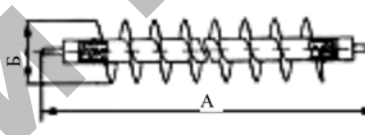


Рисунок 3.1

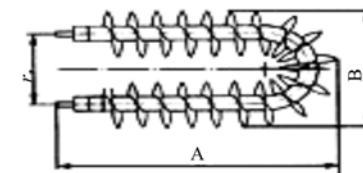


Рисунок 3.2

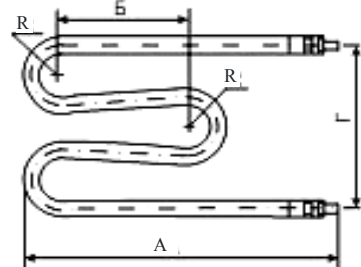


Рисунок 2.16

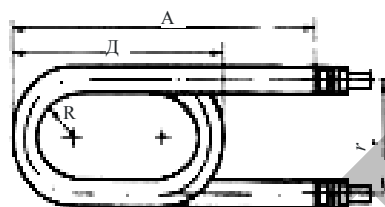


Рисунок 2.17

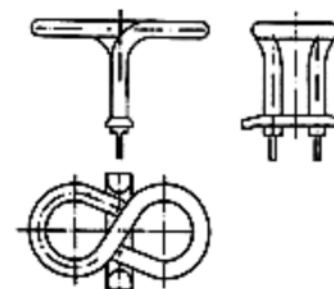


Рисунок 4.101

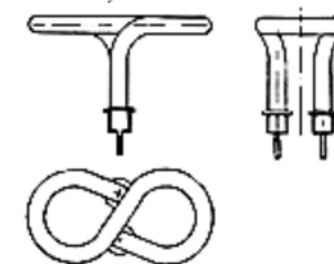


Рисунок 4.102

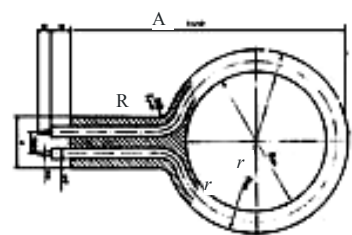


Рисунок 2.18

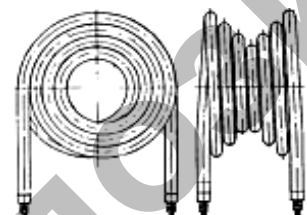


Рисунок 2.19

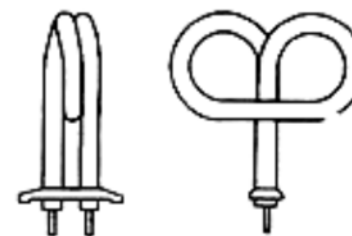


Рисунок 4.103

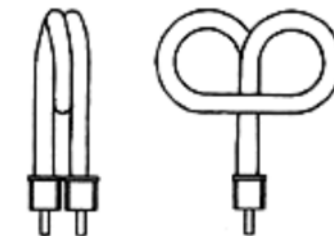


Рисунок 4.104

Окончание прил. 2

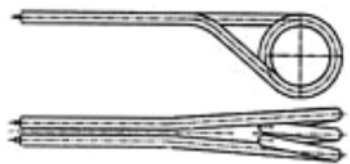


Рисунок 4.701



Рисунок 4.702



Рисунок 4.801



Рисунок 4.802



Рисунок 4.803



Рисунок 4.804

Свойства сухого воздуха (при атмосферном давлении)

Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость при постоян. давлении, ·10 ³ Дж/(кг·°С)	Теплопроводность, 10 ⁻² Вт/(м·°С)	Температуропроводимость, ·10 ⁻⁶ м ² /с	Динамическая вязкость, ·10 ⁻⁵ Па·с	Кинематическая вязкость, ·10 ⁻⁶ м ² /с	Число Прандтля
-50	1,534	1,013	2,034	13,15	1,46	9,54	0,726
-20	1,365	1,010	2,253	14,02	1,627	11,93	0,724
0	1,252	1,010	2,371	18,77	1,715	13,70	0,722
20	1,164	1,013	2,521	21,30	1,822	15,70	0,722
40	1,092	1,013	2,650	24,02	1,920	17,60	0,722
60	1,025	1,018	2,800	26,83	2,010	19,60	0,722
80	0,968	1,021	2,930	29,60	2,097	21,70	0,722
100	0,916	1,021	3,070	32,80	2,176	23,78	0,722
140	0,827	1,026	3,324	39,20	2,372	28,45	0,722
180	0,755	1,034	3,570	45,88	2,50	33,17	0,722
200	0,723	1,034	3,700	49,50	2,59	35,82	0,722
250	0,653	1,043	3,977	59,00	2,794	42,80	0,722
300	0,596	1,047	4,290	69,00	2,970	49,90	0,722
350	0,549	1,055	4,570	79,00	3,15	57,50	0,722
400	0,508	1,030	4,850	90,10	3,29	64,9	0,722
500	0,450	1,072	5,400	111,2	3,62	80,4	0,722
600	0,400	1,088	5,820	136,6	3,92	98,1	0,723
800	0,325	1,114	6,680	189,0	4,45	137,0	0,725
1000	0,268	1,140	7,610	250,0	4,95	185,0	0,727
1200	0,238	1,164	8,450	314,0	5,39	232,0	0,730
1400	0,204	1,190	9,300	384,0	5,78	282,0	0,736
1600	0,182	1,220	10,110	459,0	6,16	338,0	0,740
1800	0,165	1,224	10,820	534,0	6,66	397,0	0,740

149

Относительный коэффициент лучеиспускания материалов

Материал	Температура, °С	Коэффициент лучеиспускания
Алюминий полированный	50–500	0,04–0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20–0	0,06–0,07
Алюминий, сильно окисленный	50–500	0,2–0,3
Алюминиевый лак по шероховатой поверхности	20	0,4
Алюминиевая краска	50	0,5
Алюминиевая бронза	20	0,6
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая шероховатая	50–150	0,55
Вольфрам	200	0,05
	600–1000	0,1–0,16
	1500–2000	0,24–0,31
Железо листовое, оцинкованное и окисленное	20	0,28
Жесть белая старая	20	0,28
Латунь полированная	200	0,03
Латунь матовая тусклая	20–350	0,22
Латунь листовая прокатанная	20	0,06
Латунь листовая, обработанная наждаком	20	0,2
Латунь, окисленная при 600 °С	200–600	0,69–0,61
Медь полированная	50–100	0,02
Медь торговая, шабренная до блеска	20	0,07
Медь окисленная	50	0,6
То же	500	0,88
Молибден	600–1000	0,08–0,13
	1500–2200	0,19–0,26
Молибденовая нить	700–2500	0,1–0,3
Никель технический чистый полированный	200–400	0,7–0,9

150

Материал	Температура, °С	Коэффициент лучеиспускания
Чугунное литье	50	0,81
Асбестовый картон	20	0,96
Асбестовая бумага	40–400	0,94–0,93
Асбошифер	20	0,96
Бумага	20	0,8–0,9
Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
Смоленная металлическая поверхность	20	0,98
Гипс	20	0,8–0,9
Дерево строганое	20	0,8–0,9
Кварц плавленный шероховатый	20	0,93
Кирпич шамотный	20	0,85
	1000	0,75
	1200	0,59
Кирпич диносовый	1000	0,66
Кирпич диносовый неглазурованный шероховатый	1000	0,8
Кирпич диносовый глазурованный шероховатый	1100	0,85
Кирпич корундовый	1000	0,46
Кирпич магнезитовый	1000–1300	0,38
Кирпич красный шероховатый	20	0,88–0,93
Кирпичная кладка оштукатуренная	20	0,94
Лак черный матовый	40–100	0,96–0,98
Лак черный блестящий, распыленный на железе	20	0,87
Лак белый	40–100	0,8–0,95
Масляные краски различных цветов	100	0,92–0,93
Мрамор сероватый полированный	20	0,93
Резина твердая	20	0,95
Резина мягкая серая шероховатая	20	0,86
	20–100	0,94–0,91

151

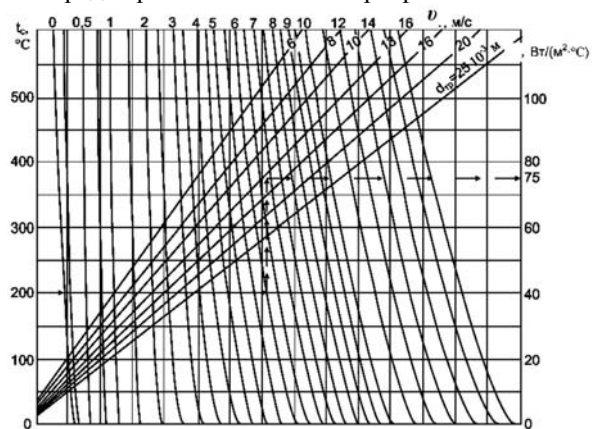
Окончание прил. 4

Материал	Температура, °С	Коэффициент лучеиспускания
Стекло	250–1000	0,87–0,72
	1100–1500	0,7–0,67
	20	0,91–0,93
Толь	100–600	0,81–0,79
Уголь	1000–1400	0,53
Угольная нить	20	0,92
Фарфор глазурованный	20	0,82
Шеллак черный, блестящий на железе	75–150	0,91
Шеллак черно-матовый	0–100	0,97–0,93
Шлаки котельные	20–1200	0,89–0,7
То же	20	0,9
Эмаль белая		

152

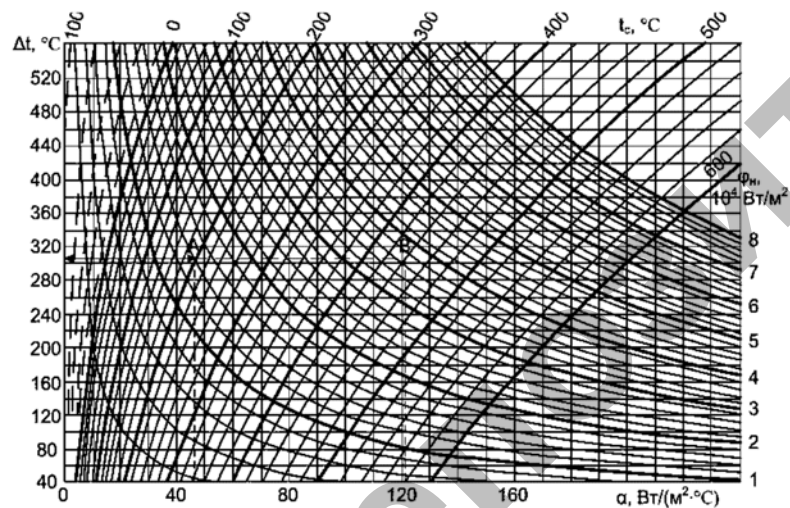
Приложение 5

Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры t_c и скорости воздуха ν для одиночного или редко расположенных неоребранных ТЭНов



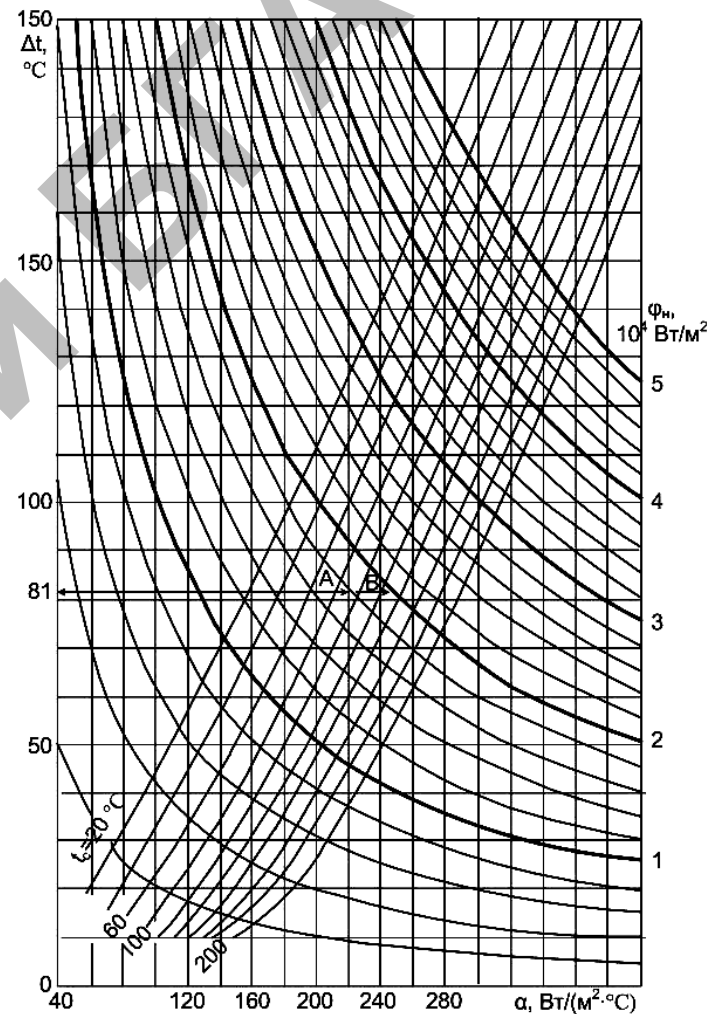
Приложение 6

Зависимость разности температур поверхности нагревателя и среды Δt от коэффициента теплоотдачи α и удельной мощности φ_n



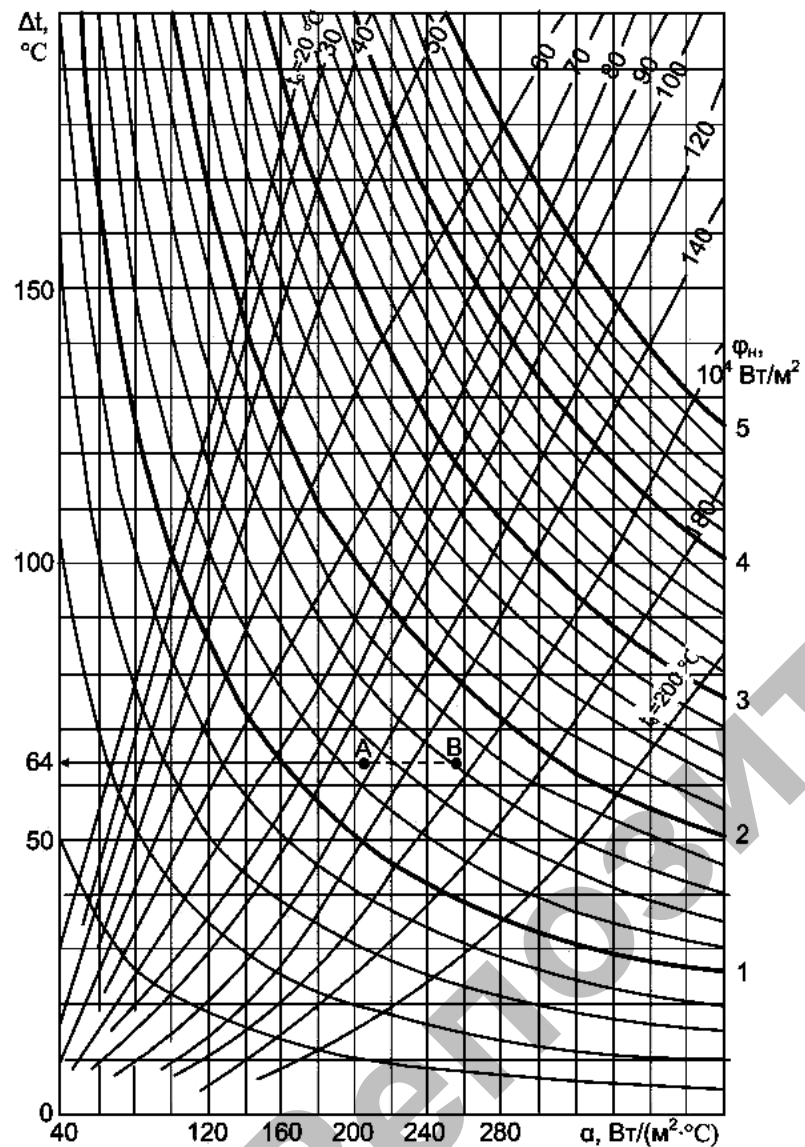
Приложение 7

Зависимость разности температур поверхности оболочки горизонтально расположенного ТЭНа и масла Δt от коэффициента теплоотдачи α и удельной мощности φ_n



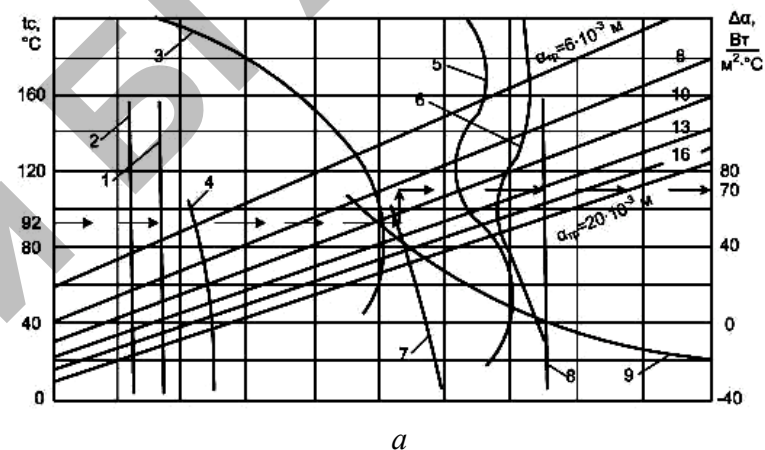
Приложение 8

Зависимость разности температур поверхности оболочки вертикально расположенного ТЭНа и масла Δt коэффициента теплоотдачи α и удельной мощности φ_n

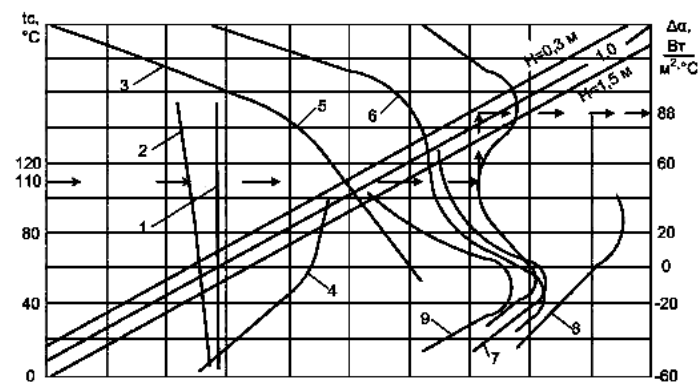


Приложение 9

Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры t_c и вида масла для горизонтально (а) и вертикально (б) расположенных ТЭНов различного диаметра $d_{\text{тп}}$ и длины погруженной активной Н: 1 – масло МК; 2 – масло МС-20; 3 – технический саломас «Тигр-44»; 4 – масло ВМ-4; 5 – хлопковое масло рафинированное; 6 – подсолнечное масло; 7 – трансформаторное масло; 8 – масло ТМ-1; 9 – масло ХФ-22



а



б

Формулы для расчета коэффициента теплоотдачи от нагревателей к газу

Характер движения газа	Схема расположения нагревателей	Коэффициент теплоотдачи Вт/(м ² ·°C)	Уточняющие коэффициенты																																																					
1. Движение внутри трубы: $Re \leq 2300$, $p = 10^5$ Па, $t_{гр} - t_c$ не велико		$\alpha = \alpha_n \varepsilon_i \varepsilon_t$ $\alpha_n = 1,61 \frac{v^{1/3}}{d^{2/3}} \frac{\lambda}{d^{1/3} l^{1/3}}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Re</th> <th colspan="8">Значение ε_e при $l/d_{гр}$</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>5</th> <th>10</th> <th>20</th> <th>30</th> <th>40</th> <th>50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$< 2,3 \cdot 10^3$</td> <td>1,9</td> <td>1,7</td> <td>1,44</td> <td>1,28</td> <td>1,13</td> <td>1,05</td> <td>1,02</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$1 \cdot 10^4$</td> <td>1,65</td> <td>1,5</td> <td>1,34</td> <td>1,23</td> <td>1,13</td> <td>1,07</td> <td>1,03</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$1 \cdot 10^5$</td> <td>1,28</td> <td>1,22</td> <td>1,15</td> <td>1,1</td> <td>1,06</td> <td>1,03</td> <td>1,02</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>$2 \cdot 10^6$</td> <td>1,14</td> <td>1,11</td> <td>1,08</td> <td>1,05</td> <td>1,03</td> <td>1,02</td> <td>1,01</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Re	Значение ε_e при $l/d_{гр}$								1	2	5	10	20	30	40	50	$< 2,3 \cdot 10^3$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,13	1,05	1,02	1	$1 \cdot 10^4$	1,65	1,5	1,34	1,23	1,13	1,07	1,03	1	$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,1	1,06	1,03	1,02	1	$2 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1,02	1,01	1
Re	Значение ε_e при $l/d_{гр}$																																																							
	1	2	5	10	20	30	40	50																																																
$< 2,3 \cdot 10^3$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,13	1,05	1,02	1																																																
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,5	1,34	1,23	1,13	1,07	1,03	1																																																
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,1	1,06	1,03	1,02	1																																																
$2 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1,02	1,01	1																																																
2. Движение внутри трубы: $Re > 10000$, $p \geq 10^5$ Па		$\alpha = \alpha_n \varepsilon_i \varepsilon_t$ $\alpha_n = 0,023 \frac{v^{0,8} \lambda}{v^{0,4} d^{0,4} d_{гр}^{0,2}}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$0,5(t_1+t_2)$</th> <th>0</th> <th>50</th> <th>100</th> <th>200</th> <th>300</th> <th>400</th> <th>500</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ε_t</td> <td>0,77</td> <td>0,82</td> <td>0,84</td> <td>0,89</td> <td>0,94</td> <td>0,97</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	$0,5(t_1+t_2)$	0	50	100	200	300	400	500	ε_t	0,77	0,82	0,84	0,89	0,94	0,97	1																																					
$0,5(t_1+t_2)$	0	50	100	200	300	400	500																																																	
ε_t	0,77	0,82	0,84	0,89	0,94	0,97	1																																																	
3. Поперечное обтекание проволочных (а) и ленточных (б) зигзагообразных и проволочных спиральных (в) нагревателей $Re \leq 1000$		$\alpha = \alpha_n \varepsilon_i$ $\alpha_n = 10,79 \frac{\lambda^{0,62} c^{0,38} \rho^{0,47} v^{0,47}}{\mu^{0,09} d^{0,53}}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>$0,5(t_1+t_2)$</th> <th>0</th> <th>50</th> <th>100</th> <th>200</th> <th>300</th> <th>400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ε_t</td> <td>0,65</td> <td>0,7</td> <td>0,73</td> <td>0,8</td> <td>0,88</td> <td>0,95</td> </tr> </tbody> </table> <p>t_1, t_2 - температура входящего и выходящего газа. Если спираль или зигзаг размещены на опоре, уменьшить α, соответственно, в 1,3 и 1,6 раза</p>	$0,5(t_1+t_2)$	0	50	100	200	300	400	ε_t	0,65	0,7	0,73	0,8	0,88	0,95																																							
$0,5(t_1+t_2)$	0	50	100	200	300	400																																																		
ε_t	0,65	0,7	0,73	0,8	0,88	0,95																																																		
4. Поперечное обтекание проволочных (а) и ленточных (б) зигзагообразных и проволочных спиральных (в) нагревателей $Re > 1000$		$\alpha = \alpha_n \varepsilon_i$ $\alpha_n = 2,73 \frac{\lambda^{0,62} c^{0,38} \rho^{0,62} v^{0,62}}{\mu^{0,24} d^{0,38}}$																																																						

157

Окончание приложения 10

Характер движения газа	Схема расположения нагревателей	Коэффициент теплоотдачи Вт/(м ² ·°C)	Уточняющие коэффициенты
5. Поперечное обтекание шахматных пучков гладких труб		$\alpha = \alpha_n \varepsilon_z \varepsilon_p$ $\alpha_n = 0,334 \frac{\lambda Pr^{0,35}}{d^{0,4}} \left(\frac{S_1 - d_{гр}}{S - d_{гр}} \right)^{0,25} \left(\frac{g}{y} \right)^{0,6}$ $n \text{ при } (S_1 - d_{гр}) / (S - d_{гр}) \geq 0,7$ $\alpha_n = 0,305 \frac{\lambda Pr^{0,35}}{d^{0,4}} \left(\frac{v}{y} \right)^{0,6}$ $n \text{ при } (S_1 - d_{гр}) / (S - d_{гр}) < 0,7$	 Расположение нагревателей: 1 - коридорное 2 - шахматное 2 - количество нагревателей
6. Поперечное обтекание коридорных пучков гладких труб		$\alpha = \alpha_n \varepsilon_z \varepsilon_p$ $\alpha_n = 0,2 \frac{\lambda Pr^{0,35}}{d_{гр}^{0,36}} \left(\frac{g}{y} \right)^{0,64}$	
7. Поперечное обтекание шахматных пучков труб с поперечными ребрами		$\alpha = \alpha_n k \varepsilon_z \varepsilon_p$ $\alpha_n = 0,213 \frac{\lambda}{S_p^{0,35}} Pr^{0,35} \left(\frac{\alpha_{гр}}{S_p} \right)^{-0,54} \left(\frac{h_p}{S_p} \right)^{-0,14} \left(\frac{g}{y} \right)^{0,65}$	
8. Поперечное обтекание коридорных пучков труб с поперечными ребрами		$\alpha = \alpha_n k \varepsilon_z \varepsilon_p$ $\alpha_n = 0,995 \frac{\lambda}{S_p^{0,28}} Pr^{0,35} \left(\frac{\alpha_{гр}}{S_p} \right)^{-0,54} \left(\frac{h_p}{S_p} \right)^{-0,14} \left(\frac{v}{y} \right)^{0,72}$	 K=1,0 - круглое оребрение, K=0,92 - квадратное, p - объемная доля водяных паров


158

Приложение 11

Низкотемпературные кабели до 100 °С

НО – электрический нагревательный кабель для подогреваемых полов, подогрева грунта в теплицах и парниках, а также подогрева грунта футбольных полей и других спортивных сооружений.

Технические характеристики



Максимальная температура жилы	100 °С
Максимально допустимая температура без нагрузки	100 °С
Минимальная температура монтажа	-10 °С
Напряжение питания	~220–240 В (~380 В по заказу)
Сопротивление изоляции, не менее	1×10^5 МОм·м
Минимальный радиус изгиба при эксплуатации и хранении	150 мм
Минимальный допустимый радиус однократного изгиба	30 мм

Технические и габаритные характеристики


Марка кабеля	Число и диаметр проволок нагревательной жилы, мм	Ном. наружный диаметр провода, мм	Сопротивление жил, Ом/м	Материал жилы
НО-3 НО-33	1×0,3	5,3	19,8	Сплав
	1×0,5	5,5	7,13	
	1×0,8	5,8	2,79	
НО-13 НО-43 НО-15 НО-45	3×0,25	5,5	1,43	Сталь оцинк.
	4×0,25	5,6	1,07	
	7×0,25	5,8	0,62	
	10×0,25	6,0	0,43	
	10×0,30	6,2	0,30	
НО-17	7×0,25	5,8	0,22	Латунь
	10×0,25	6,0	0,15	
НО-23 НО-55	7×0,28	5,7	0,041	Медь
		5,7		

Нагревательные секции на основе кабелей НО

Тип секции	Тепло-выделение, Вт/м	Длина секции, м	Мощность секции, Вт
ТЛЭ-19	14,6	13	190
ТЛЭ-33	15,7	21	330
ТЛЭ-59	19,7	30	590
ТЛЭ-70	18,4	38	700
ТЛЭ-80	19,0	42	800
ТЛЭ-90	18,8	48	900
ТЛЭ-105	21,0	50	1050
ТЛЭ-120	19,0	63	1200
ТЛЭ-140	18,7	75	1400
ТЛЭ-180	20,0	90	1800
ТЛЭ-210	20,0	105	2100
ТЛЭ-250	20,0	125	2500

БНО – электрический двухжильный нагревательный кабель с особо низким уровнем электромагнитных полей для подогреваемых полов в жилых помещениях.

Технические характеристики



Максимальная температура жилы	100 °С
Максимально допустимая температура без нагрузки	100 °С
Минимальная температура монтажа	-10 °С
Напряжение питания	~220–240 В (~380 В по заказу)
Сопротивление изоляции, не менее	1×10^4 МОм·м
Минимальный радиус изгиба при эксплуатации и хранении	150 мм
Минимальный допустимый радиус однократного изгиба	30 мм

Технические и габаритные характеристики

Марка кабеля	Число и диаметр проволок нагревательной жилы, мм	Ном. наружный диаметр провода, мм	Сопротивление жилы, Ом/м	Материал жилы
БНО	2×0,3	5,3×7,6	9,93	Сплав высокого сопрот.
	3×0,3	5,3×7,6	6,62	
	4×0,3	5,3×7,6	4,47	
	2×0,5	5,3×7,6	3,58	
	3×0,5	5,3×7,6	2,38	
БНО	3×0,25	5,3×7,6	1,43	Сталь оцинк.
	4×0,25	5,3×7,6	1,07	
	7×0,25	5,3×7,6	0,62	
	10×0,25	5,3×7,6	0,43	
БНО	7×0,25	5,3×7,6	2,28	Латунь

Нагревательные секции на основе кабелей БНО

Тип секции	Тепло-выделение, Вт/м	Длина секции, м	Мощность секции, Вт
ЕСО 5-100	18,9	5,3	100
ЕСО 18-270	15,0	18	270
ЕСО 21-340	16,2	21	340
ЕСО 23-420	18,3	23	420
ЕСО 26-520	20,0	26	520
ЕСО 32-630	19,7	32	630
ЕСО 42-800	19,0	42	800
ЕСО 48-900	18,8	48	900
ЕСО 63-1200	19,0	63	1200
ЕСО 75-1400	18,7	75	1400
ЕСО 100-2000	20,0	100	2000

НБ – электрический нагревательный кабель с мощной двухпроводной проволочной броней для обогрева дорог, трубопроводов, водостоков.

Технические характеристики



Максимальная температура жилы	130 °С
Максимально допустимая температура без нагрузки	130 °С
Минимальная температура монтажа	-20 °С
Напряжение питания	~220–240 В (~380 В по заказу)
Сопротивление изоляции, не менее	1×10 ⁵ МОм·м
Минимальный радиус изгиба при эксплуатации и хранении	400 мм
Минимальный допустимый радиус однократного изгиба	80 мм

Технические и габаритные характеристики

Марка кабеля	Число и диаметр проволок нагревательной жилы, мм	Ном. наружный диаметр провода, мм	Сопротивление жилы, Ом/м	Материал жилы
НБ	3×0,25	8,50	1,45	Сталь оцинк.
	4×0,25	8,50	1,08	
	7×0,25	8,50	0,62	
	10×0,25	8,50	0,43	
	10×0,30	8,50	0,30	
НБ	7×0,28	8,50	0,041	Медь
	7×0,37	8,50	0,025	
	7×0,52	8,50	0,014	
	7×0,67	8,50	0,008	
	7×0,85	8,50	0,0045	

Нагревательные секции на основе кабелей НБ							
Системы «ТЕПЛОДОР», $U_1=35 \text{ Вт/м}$, $t_{\text{окр}}=5^\circ\text{C}$				Системы «ТЕПЛОСКАТ», $U_1=30 \text{ Вт/м}$, $t_{\text{окр}}=5^\circ\text{C}$			
Тип секции	Длина секции, м	Мощность секции, Вт	Стартовая мощность при 5°C , Вт	Тип секции	Длина секции, м	Мощность секции, Вт	Стартовая мощность при 5°C , Вт
НБ 3x0,25с	28	975	1280	НБ 3x0,25с	30	898	1195
НБ 4x0,25с	33	1108	1450	НБ 4x0,25с	35	1030	1365
НБ 7x0,25с	43	1500	1945	НБ 7x0,25с	47	1355	1780
НБ 10x0,25с	52	1790	2300	НБ 10x0,25с	56	1635	2135
НБ 10x0,30с	63	2145	2730	НБ 10x0,30с	67	1980	2570
НБ 7x0,28м	160	5540	7900	НБ 7x0,28м	178	5300	6670
НБ 7x0,37м	215	7470	10270	НБ 7x0,37м	230	6825	9600
НБ 7x0,52м	304	10618	14345	НБ 7x0,52м	325	9670	13415
НБ 7x0,67м	395	13760	18328	НБ 7x0,67м	420	12540	17195
НБ 7x0,85м	500	17600	23300	НБ 7x0,85м	550	16600	21200

НБ – электрический нагревательный кабель с мощной двухповивной проволочной броней для обогрева дорог, трубопроводов, водостоков.

Технические характеристики



Максимальная температура жилы	130 °C
Максимально допустимая температура без нагрузки	130 °C
Минимальная температура монтажа	-20 °C
Напряжение питания	~220–240 В (~380 В по заказу)
Сопротивление изоляции, не менее	1×10^5 МОм·м
Минимальный радиус изгиба при эксплуатации и хранении	400 мм
Минимальный допустимый радиус однократного изгиба	120 мм

Технические и габаритные характеристики

Марка кабеля	Число и диаметр проволоч нагревательной жилы, мм	Ном. наружный диаметр провода, мм	Сопротивление одной жилы, Ом/м	Материал жилы
БНБ	2×(7×0,25)	11,3	0,62	Сталь оцинк.
	2×(10×0,25)	11,3	0,43	
	2×(10×0,30)	11,3	0,30	
БНБ	2×(7×0,37)	5,5	0,025	Медь
	2×(7×0,52)	5,6	0,014	

Нагревательные секции на основе кабелей БНБ системы «ТЕПЛОДОР», $U_1=35 \text{ Вт/м}$, $t_{\text{окр}}=5^\circ\text{C}$

Тип секции	Длина секции, м	Мощность секции, Вт	Стартовая мощность при 5°C , Вт
БНБ2×(7×0,25)с	30	1050	1357
БНБ2×(10×0,25)с	37	1295	1636
БНБ2×(10×0,30)с	45	1575	1950
БНБ2×(7×0,37)м	152	5320	7260
БНБ2×(7×0,52)м	216	7560	10190

Системы «ТЕПЛОМАГ», $U_1=30 \text{ Вт/м}$, $t_{\text{окр}}=5^\circ\text{C}$

Тип секции	Длина секции, м	Мощность секции, Вт	Стартовая мощность при 5°C , Вт
БНБ2×(7×0,25)с	37	925	1130
БНБ2×(10×0,25)с	45	1125	1355
БНБ2×(10×0,30)с	54	1350	1610
БНБ2×(7×0,37)м	183	4575	11424
БНБ2×(7×0,52)м	258	6450	15964

Системы «ТЕПЛОСКАТ», $U_1=30 \text{ Вт/м}$, $t_{\text{окр}}=5^\circ\text{C}$

Тип секции	Длина секции, м	Мощность секции, Вт	Стартовая мощность при 5°C , Вт
БНБ2×(7×0,25)с	33	990	1250
БНБ2×(10×0,25)с	40	1200	1525
БНБ2×(10×0,30)с	48	1440	1840
БНБ2х×(7×0,37)м	163	4890	6800
БНБ2×(7×0,52)м	230	6900	9495

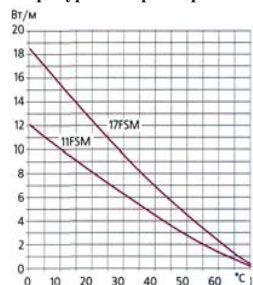
FSM – саморегулирующаяся электрическая нагревательная лента для защиты от замерзания или поддержания заданной температуры трубопроводов и резервуаров в строительной промышленности.



Технические характеристики

Максимальная температура	65 °С
Максимально допустимая температура без нагрузки (1000 часов суммарно)	85 °С
Минимальная температура монтажа	-30 °С (-20 °С по нормам CENELEC)
Напряжение питания	~220-240 В (~110-120 В по заказу)
Температурная классификация	T6 (85 °С)
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты, мм:	
FSM...XT	7,9×5,6
FSM...XF	7,8×5,6
Минимальный радиус изгиба, мм:	
FSM...XT	20
FSM...XF	25

Температурная характеристика



Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °С	Стартовый ток, А/м	230 В			
			6 А	10 А	16 А	20 А
11FSM	5	0,073	76	126	128	—
	0	0,081	70	118	128	—
	-20	0,111	46	78	124	128
	-40	0,140	36	60	96	120
17FSM	5	0,103	54	88	102	—
	0	0,114	50	84	102	—
	-20	0,156	34	56	88	102
	-40	0,198	26	42	68	86

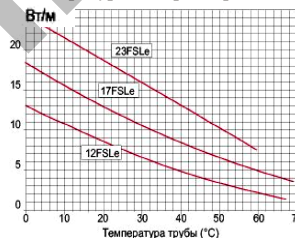
FSLe – саморегулирующаяся электрическая нагревательная лента для защиты от замерзания или поддержания заданной температуры трубопроводов и резервуаров в строительной промышленности.



Технические характеристики

Максимальная температура	65 °С
Максимально допустимая температура без нагрузки (1000 часов суммарно)	85 °С
Минимальная температура монтажа	-30 °С
Напряжение питания	~220-240 В (~110-120В по заказу)
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты, мм:	
FSLe	3,9×8,5
FSLe...C	4,7×9,3
FSLe...CT	5,9×10,5
FSLe...CF	5,9×10,5
Минимальный радиус изгиба, мм:	
FSLe	25
FSLe...C	30
FSLe...CT	35
FSLe...CF	35

Температурная характеристика



Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °С	Стартовый ток, А/м	230 В		
			6 А	10 А	16 А
12FSLe	5	0,076	78	132	180
	0	0,081	74	124	180
	-20	0,106	56	94	150
	-40	0,100	46	76	124
17FSLe	5	0,096	62	104	146
	0	0,101	60	100	146
	-20	0,123	48	82	130
	-40	0,144	42	70	112
23FSLe	5	0,130	46	76	124
	0	0,141	42	70	114
	-20	0,181	34	56	88
	-40	0,222	28	46	72
31FSLe	5	0,175	34	58	92
	0	0,190	32	52	84
	-20	0,244	24	40	56
	-40	0,299	20	34	54

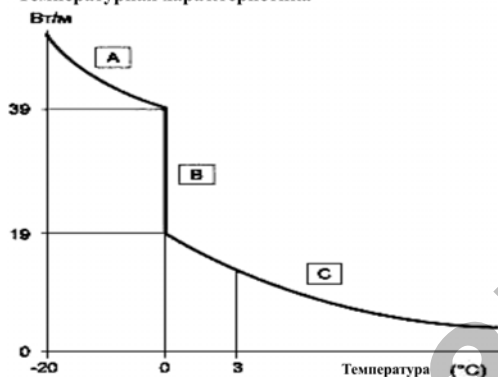
GTe – саморегулирующаяся электрическая нагревательная лента для защиты крыш и желобов от скопления снега и льда.



Технические характеристики

Максимальная температура (рабочая под нагрузкой)	65 °C
Минимальная температура монтажа	-30 °C
Напряжение питания	~220–240 В (~110–120 В по заказу)
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты	10,5×5,9 мм
Минимальный радиус изгиба	35 мм

Температурная характеристика



Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °C	Стартовый ток, А/м	230 В				
			6 А	10 А	16 А	20 А	30 А
GTe	10	0,360	34	56	88	92	–
	0	0,291	28	48	76	92	–
	-20	0,237	22	36	58	74	92

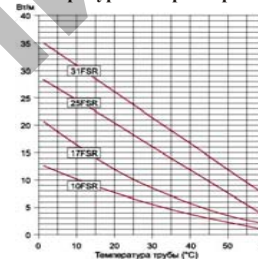
FSR – саморегулирующаяся электрическая нагревательная лента для защиты от замерзания или поддержания заданной температуры трубопроводов и резервуаров.



Технические характеристики

Максимальная температура	65 °C
Максимально допустимая температура без нагрузки (1000 часов суммарно)	85 °C
Минимальная температура монтажа	-30 °C (-20 °C по нормам CENELEC)
Напряжение питания	~220–240 В (~110–120 В по заказу)
Температурная классификация	T6 (85 °C)
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты, мм:	
FSR	10,9×3,8
FSR...C	11,8×4,7
FSR...CT	13,1×6,0
FSR...CF	13,1×6,0
Минимальный радиус изгиба, мм:	
FSR	25
FSR...C	30
FSR...CT	35
FSR...CF	35

Температурная характеристика



Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °C	Стартовый ток, А/м	230 В				
			6 А	10 А	16 А	20 А	25 А
10FSR	0	0,082	74	122	196	198	–
	-20	0,118	50	84	136	170	198
	-40	0,136	44	74	118	148	184
17FSR	0	0,123	48	82	130	154	–
	-20	0,152	40	66	106	132	154
	-40	0,201	30	50	80	100	124
25FSR	0	0,161	36	62	98	122	124
	-20	0,209	20	34	56	70	88
	-40	0,253	20	32	50	64	80
31FSR	0	0,194	20	34	54	66	84
	-20	0,240	16	26	40	50	64
	-40	0,279	14	24	38	48	60
40FSR	0	0,259	14	24	40	50	62
	-20	0,320	12	20	30	38	48
	-40	0,371	10	18	30	36	46

HW-R – саморегулирующаяся электрическая нагревательная лента для поддержания температуры в системах обеспечения горячей водой жилых домов и коммерческих зданий.



Технические характеристики

Максимальная температура	100 °С
Минимальная температура монтажа	-10 °С
Напряжение питания	~220–240 В или ~110–120 В
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты	13,6×6,0 мм
Минимальный радиус изгиба	25 мм

Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °С	Стартовый ток, А/м	230 В			
			6 А	10 А	16 А	20 А
HW-R	18	0,114	52	88	138	–
	0	0,163	36	62	98	122

HW-P – саморегулирующаяся электрическая нагревательная лента для поддержания температуры в системах обеспечения горячей водой в гостиницах, больницах и санаториях.



Технические характеристики

Максимальная температура	100 °С
Минимальная температура монтажа	-10 °С
Напряжение питания	~220–240 В или ~110–120 В
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты	13,6×6,0 мм
Минимальный радиус изгиба	25 мм

Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °С	Стартовый ток, А/м	230 В			
			6 А	10 А	16 А	20 А
HW-P	18	0,142	42	70	110	–
	0	0,177	34	56	90	110

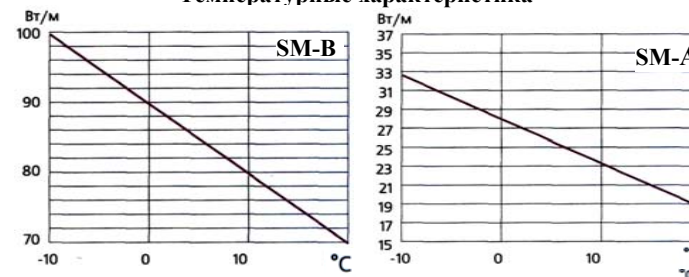
SM – саморегулирующаяся нагревательная лента для снегоудаления и предотвращения обледенения дорог, пандусов.



Технические характеристики

Максимальная температура	65 °С
SM-B	100 °С
Максимально допустимая температура без подачи мощности (1000 ч суммарно):	85 °С
SM-A	105 °С
SM-B	105 °С
Минимальная температура монтажа	0 °С
Рабочее напряжение	~220–240 В (по заказу ~110–120 В)
Максимальное сопротивление защитной оплетки	18,2 Ом/км
Габариты, мм:	
SM-A	7,9×5,6
SM-B	16,0×6,9
Минимальный радиус изгиба, мм:	
SM-A	20
SM-B	25

Температурные характеристики



Максимальная длина ленты (м) в зависимости от номинального тока автоматического выключателя

Марка кабеля	Температура включения, °С	Стартовый ток, А/м	230 В			
			6 А	10 А	16 А	20 А
SM-A	10	0,138	44	72	80	–
	0	0,171	36	58	80	–
SM-B	10	0,455	14	22	36	44
	0	0,536	12	18	30	38

Приложение 12

Окончание прил. 12

Типовые фольгированные нагреватели с полиамидной (К)
и силиконовой (R) изоляцией

Размеры X, мм	Размеры Y, мм	Сопротивление при 0 °C, Ом (±10%)	Эффективная площадь, м ² × 1560	Изо- ляция	Модель, номер
6,4	6,4	10.0 5.3	0,04	К	5565
6,4	1..7	15.0 7.9 4.3	0,08	К	5566
6,4	19,1	20.0 10.5 5.7	0,13	К	5567
6,4	25,4	25.0 13.1 7.1	0,18	К	5568
6,4	31,8	30.0 15.8 8.5	0,23	К	5569
6,4	38,1	35.0 18.4 10.0 4.7	0,27	К	5570
6,4	44,5	40.0 21.0 11.4 5.3	0,32	К	5571
6,4	58,4	17.4 9.2 5.2	0,38	К,R	5200
6,4	173,2	100 46.7 28.2 13.6	1,22	К,R	5201
6,4	194,8	143 71.7 38.1 19.1	1,15	К,R	5202
6,4	264,2	160 80.1 48.4 23.3	1,55	К,R	5203
6,9	50,8	18.9 9.5 5.7	0,35	К,R	5204
6,9	139,7	153 76.5 40.7 20.4	0,87	К	5205
6,9	175,3	220 110 65.5 32.1	1,40	К	5206
7,6	38,1	42.1 20.7 12.5 6.1	0,30	К,R	5207
7,6	79,0	44.1 22.1 13.3 6.4	0,70	К,R	5208
7,6	79,0	31.7 15.8 9.6 4.6	0,72	К,R	5209
8,6	88,1	120 56.1 33.9 16.3	0,88	К	5210
9,1	201,9	225 113 68.3 32.8	1,97	К,R	5211
9,4	154,0	73.1 36.4 22.1 10.6	1,68	К,R	5212
9,4	513,1	130 65.0 39.9 18.9 12.9 9.1	5,54	R	5213
10,2	66,0	123 62.5 37.8 18.2	0,74	К,R	5215
10,4	121,9	100 50.1 30.2 14.5	1,40	К,R	5218
10,4	210,8	61.9 31.1 18.8 9.1 6.2 4.3	2,50	К,R	5219
10,4	228,6	199 99.7 60.3 29.1	2,77	К,R	5220
10,7	58,4	50.1 26.1 15.3 7.3	0,67	К,R	5222
10,7	124,5	198 100 60.2 28.9	1,55	К	5224
10,7	180,3	322 161 85.7 42.8	2,06	К,R	5225
10,7	365,8	709 354 189 94.3	4,17	К	5227
10,9	100,3	238 119 63.3 31.7	1,22	К	5228
10,9	139,7	131 65.8 35.0 17.5	1,70	К,R	5229
10,9	149,9	37.3 18.8 11.3 5.4 3.7	1,87	К,R	5230
11,2	76,2	27.8 13.6 8.2 3.9	1,03	К,R	5231
11,2	76,2	45.8 22.9 13.8 6.6	1,03	К,R	5232
11,2	76,2	77.7 38.8 23.5 11.3	1,03	К,R	5233
11,4	98,6	153 76.4 40.7 20.3	1,17	К	5234
11,4	98,6	102 51.1 30.9 14.8	1,16	К,R	5235
11,4	98,6	134 67.3 40.7 19.6	1,16	К	5236

Размеры X, мм	Размеры Y, мм	Сопротивление при 0 °C, Ом (± 10 %)	Эффективная площадь, м ² × 1560	Изо- ляция	Модель, номер
11,4	98,6	102 51.2 27.2 13.6	1,17	К,R	5237
11,7	129,5	264 132 79.9 38.4	1,77	К	5238
12,2	114,3	47.1 23.6 14.3 6.8 4.7	1,60	К,R	5239
12,2	159,5	70.2 35.1 18.7 9.3 6.2 4.7	2,20	К,R	5240
12,4	121,9	170 85.1 51.5 24.7	1,60	К,R	5241
12,7	12,7	26.5 13.9 7.5	0,19	К	5572
12,7	19,1	30.0 15.7 8.5	0,30	К,R	5573
12,7	25,4	35.0 18.3 10.0 4.6	0,41	К,R	5574
12,7	31,8	40.0 20.9 11.4 5.3	0,52	К,R	5575
12,7	38,1	45.0 23.5 12.8 5.9 4.4	0,63	К,R	5576
12,7	44,5	50.0 26.1 14.2 6.6 4.9	0,74	К,R	5577
44,5	3,0	61.1 30.5 18.5 8.9 6.1 4.2	2,19	К,R	5545
47,0	3,0	61.2 30.6 18.5 8.9 6.1 4.2	2,44	К,R	5546
48,3		156 78.4 47.4 22.8	2,48	К,R	5547
50,8	3,1	100 51.9 28.4 13.0 9.6 7.1	2,93	К,R	5598
54,1	28,4	180 90.1 54.6 26.3	2,16	К,R	5548
62,2		530 265 160 7.1	4,16	К,R	5549
72,4		200 100 56.0 26.0 20.0 14.0	5,98	К,R	5583
76,2	3,1	378 194 107 48.0 34.7 25.4	6,61	К,R	5188
86,4		198 99.0 55.4 25.7 19.8 13.9	8,32	К,R	5564
94,5	53,1	317 158 95.9 46.1 31.6 22.1	6,76	К,R	5550
109,2	86,9	405 206 125 60.1	3,91	К,R	5551
120,7	63,5	54.5 27.3 14.5 7.2 4.8 3.6	11,48	К,R	5552
152,4	3,1	150 77.4 42.5 19.2 14.0 10.3	27,02	К,R	5599
158,8	50,8	610 305 185 88.8 60.7 42.5	25,66	К,R	5553
171,5	120,7	251 125 76.1 36.6 25.1 17.5	15,79	К,R	5554
179,3		120 60.1 31.9 16.1 10.6 7.4	37,19	К,R	5555
209,6	109,7	670 335 202 97.4 67.1 47.4	36,13	К,R	5556
228,6	76,2	710 355 215 101 70.6 49.4	52,46	К,R	5557
243,8	22,9	72.7 36.3 21.9 10.6 7.2 5.1	67,65	К,R	5558
254,0	6,4	667 334 201 96.7 67.1 47.7	74,78	К,R	5559

Приложение 13

Типовые проволочные поверхностно распределенные нагреватели
с силиконовой изоляцией

Размер X		Размер Y		Модель, номер	
25	76	254	381	HR6603	HR6643
25	76	305	508	HR6695	HR6645
25	76	381	635	HR6605	HR6647
25	76	508	762	HR6607	HR6649
25	72	610	889	HR6697	HR6651
25	76	635	1916	HR6609	HR6653
25	102	762	127	HR6611	HR6657
25	102	889	254	HR6613	HR6659
25	102	1016	381	HR6615	HR6661
25	102	1524	508	HR6617	HR6663
51	102	127	635	HR6620	HR6665
51	102	254	762	HR6622	HR6667
51	102	381	889	HR6624	HR6669
51	102	508	1016	HR6626	HR6671
51	127	610	127	HR6699	HR6675
51	127	635	254	HR6628	HR6677
51	127	762	381	HR6630	HR6679
51	127	889	508	HR6632	HR6681
51	127	1016	635	HR6634	HR6683
51	127	1524	762	HR6636	HR6685
76	127	127	889	HR6639	HR6687
76	127	254	1016	HR6641	HR6689

Приложение 14

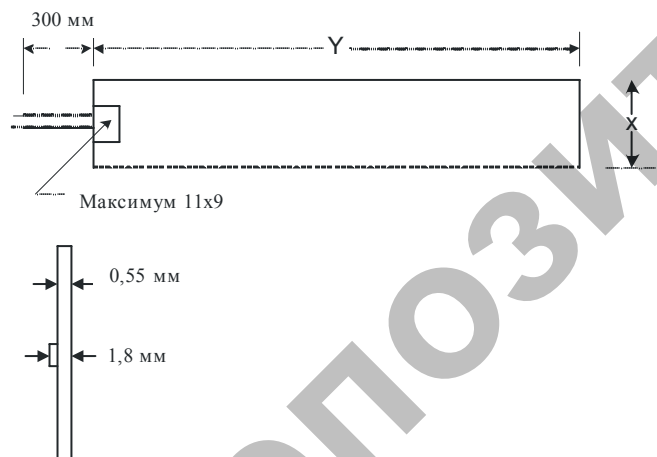
Типовые проволочные поверхностно распределительные нагреватели
с миканитовой изоляцией

Размеры X, мм	Размеры Y, мм	Сопротивление при 0 °С, Ом, ±10 %	Эффективная площадь, м ² × 1550	Модель, номер
25,4	101,6	11.0 21.2	2,5	HM6811
25,4	203,2	22.0 42.5	5,6	HM6812
25,4	254,0	29.0 56.0	7,1	HM6813
25,4	304,8	25.5 49.2	8,6	HM6814
38,1	76,2	4.5 8.7	3,2	HM6800
38,1	203,2	21.0 40.5	9,5	HM6801
38,1	304,8	13.7 26.4	14,7	HM6802
50,8	50,8	12.0 23.2	2,8	HM6815
50,8	101,6	26.0 50.2	5,9	HM6816
50,8	101,6	6.0 11.6	5,9	HM68.17
50,8	152,4	21.9 42.3	9,2	HM6803
50,8	203,2	24.0 46.3	12,6	HM6818
50,8	254,0	20.0 38.6	15,9	HM6819
50,8	304,8	18.0 34.7	19,3	HM6820
76,2	76,2	31.0 59.8	6,5	HM68.04
76,2	152,4	54.9 106.0	14,7	HM6805
76,2	304,8	18.0 34.7	30,0	HM6821
101,6	101,6	11.0 21.2	13,1	HM6822
101,6	101,6	55.0 106.2	13,1	HM6823
101,6	203,2	16.0 30.9	27,8	HM6824
101,6	304,8	16.0 30.9	42,2	HM6825
152,4	152,4	22.0 42.5	31,9	HM6826
152,4	228,6	15.0 29.0	48,7	HM6827
152,4	304,8	43.2 83.4	65,2	HM6806
203,2	203,2	22.0 42.5	58,3	HM6828
254,0	254,0	12.0 23.2	92,3	HM6829
Диаметр, мм				
38,1		2.0 3.9	1,2	HM6807
50,8		9.5 18.3	2,2	HM6830
76,2		11.1 21.4	5,4	HM6808
101,6		40.0 77.2	10,0	HM6831
127,0		30.0 57.9	16,7	HM6832
152,4		32.7 63.1	24,7	HM6809
203,2		16.0 30.9	45,4	HM6833
228,6		43.2 83.4	58,5	HM6810
254,0		30.0 57.9	72,9	HM6834
254,0		11.5 22.2	72,9	HM6835
304,8		27.0 52.1	106,0	HM6836
304,8		11.5 22.2	106,0	HM6837

Приложение 15

Типовые проволочные поверхностно распределительные нагреватели с прозрачной изоляцией

Размеры X, мм	Размеры Y, мм	Сопротивление при 0°C, Ом, ± 10 %					Эффективная площадь, м ² × 1550	Модель, номер
14,6	55,9		3,6	9,0	32,5	89,4	1,26	H6700
19,1	101,6		8,8	22,0	79,4	218	3,00	H6701
22,9	50,8		4,8	12,0	43,3	119	1,80	H6702
22,9	69,9		6,4	16,0	57,8	159	2,48	H6703
22,9	146,0		14,1	35,0	126	348	5,18	H6704
27,9	111,8		12,0	30,0	108	298	4,84	H6705
30,5	68,9		8,0	20,0	72,2	199	3,30	H6706
30,5	92,7		11,2	28,0	101	278	4,38	H6707
73,7	146,0		9,6	24,0	86,6	238	16,70	H6708
76,2	76,2		6,1	16,0	62,4	168	9,00	H6710
101,6	127,0		11,8	31,2	122	327	20,00	H6711
152,4	203,2	14,8	28,1	70,0	253	695	48,00	H6709
31,8	Диаметр		4,3	11,2	43,5	117	1,23	H6712
76,2	Диаметр		8,0	20,9	81,5	219	7,07	H6713
Проволка, диаметр, мм		Медь 0,04	Медь 0,04	Медь 0,03	Никель 0,03	Никель-хром 0,03		



Приложение 16

Типовые проволочные поверхностные распределенные нагреватели для обогрева резервуаров

Объем, л	Диаметр, мм	Мощность, Вт	Длина, мм	Ширина, мм	Модель	
					120B	240B
<i>Металлические резервуары</i>						
19	282	550	889	102	DHCS10	DHCS20
57	355	700	1118	102	DHCS11	DHCS21
114	473	1000	1496	102	DHCS13	DHCS23
208	565	1200	1778	102	DHCS15	DHCS25
<i>Пластмассовые резервуары</i>						
19	282	150	889	102	DPCS10	DPCS20
57	355	200	1118	102	DPCS11	DPCS21
114	473	250	1496	102	DPCS13	DPCS23
208	565	300	1778	102	DPCS15	DPCS25

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротермическое оборудование сельскохозяйственного производства: учеб. пособие / Л. С. Герасимович, В. А. Карасенко, Е. М. Заяц [и др.]; под ред. Л.С. Герасимовича. – Мн. : Ураджай, 1995. – 416 с.
2. Низкотемпературный электронагрев / А. П.Альтгаузен, М. Б. Гутман, С. А. Малышев [и др.]; под общ. ред. А. Д. Свенчанского. – М. : Энергия, 1978. – 208 с.
3. Высокотемпературные нагреватели Лантерм. – <http://www.launterm.ru>. 2003. – Дата доступа: 15.08.2008.
4. Продукция ООО НПЦ "УВИКОМ". <http://www.ropnet.ru>. 2003. Дата доступа: 11.11.2008.
5. Продукция завода "Углекомполит". <http://www.vugsite.dp.ua>. 2003. – Дата доступа: 21.11.2008.
6. Заяц Е. М., Карасенко В. А., Дубодел И. Б. Расчеты электротехнологического оборудования. – Мн. : УП «Технопринт», 2001. – 203 с.
7. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособие. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
8. Каталог продукции Минского завода ТЭНов «Адиполь». <http://www.adipol.minsk.by>. 2001.
9. Белавин Ю. А. [и др.]. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением / Ю.А. Белавин, М.А. Евстигнеев, А.Н. Чернявский. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
10. Прищепов М. А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства. – Мн. : БГАТУ, 1999. – 295 с.
11. Миндин Г. Р. Электронагревательные трубчатые элементы. – М. : «Энергия», 1965. – 186 с.
12. Нагревательные кабели. Каталог. ООО «Специальные Системы и Технологии». – www.sst.ru. 2004. – Дата доступа: 07.12.2008.
13. Нагревательная плита НП-15. ООО «Специальные Системы и Технологии». – www.sst.ru, 2004. – Дата доступа: 15.01.2009.
14. Кабельные системы DEVI. – www.devi.com, 2005. – Дата доступа: 18.01.2009.
15. Электрические нагревательные кабели Nexans. – www.nexans.no, 2005. – Дата доступа: 24.01.2009.

16. Kanthal Appliance Alloys Handbook. Heating Alloys for Electric Household Appliances. – www.kanthal.com, 2001. – Дата доступа: 28.05.2008.

17. Thermofoil Heaters. Bulletin HS – 202 (D). MINCO Products, Inc. www.minco.com, 2006. – Дата доступа: 13.03.2010.

18. Flexible Heaters. Electrig heater corporation TEMPCO, www.tempro.com, 2006. – Дата доступа: 20.03.2010.

19. Flexible Heaters. WATLOW, www.watlow.com, 2006. – Дата доступа: 04.04.2010.

20. Prum and Pail Heaters. BriskHeat, www.Briskheat.com, 2006. – Дата доступа: 12.05.2010.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

ЭЛЕМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОНАГРЕВА 4

1.1. Основы механизма преобразования

электрической энергии в тепловую 4

1.2. Классификация элементных нагревателей..... 5

1.3. Материалы для нагревательных элементов..... 7

1.4. Нагревательные элементы..... 16

1.5. Расчет нагревательных элементов..... 18

2. ТРУБЧАТЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ 34

2.1. Устройство и характеристики
трубчатых электрических нагревателей 34

2.2. Выбор трубчатых нагревателей..... 38

2.3. Определение температуры
поверхности нагревателя 43

2.4. Расчет трубчатых нагревателей..... 46

3. ПРОТЯЖЕННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ..... 53

3.1. Устройство и характеристики
нагревательных проводов и кабелей 53

3.2. Электрообогрев бетонных полов..... 56

3.3. Электрообогрев устройств стаивания снега и льда ... 59

3.4. Электрообогрев растительного грунта 62

3.5. Электрообогрев трубопроводов и резервуаров..... 63

3.6. Выбор нагревательных проводов и кабелей..... 65

4. ПОВЕРХНОСТНО РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ ... 77

4.1. Классификация нагревателей..... 77

4.2. Фольгированные нагреватели..... 78

4.3. Проволочные нагреватели..... 80

4.4. Композиционные нагреватели..... 81

4.5. Расчет и выбор
поверхностно распределенных нагревателей 82

5. ПРИЛОЖЕНИЯ 117

ЛИТЕРАТУРА..... 141

Учебное издание

**Зяц Андрей Евгеньевич,
Корко Виктор Станиславович,
Кустова Раиса Ивановна**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

Пособие

Ответственный за выпуск *В. П. Степанцов*
Редактор *Т. В. Каркоцкая*
Компьютерная верстка *Д. О. Хмелевская*

Подписано в печать 03.10.2011 г. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Romano. Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 8,18. Тираж 200 экз. Заказ 857.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.