

Нагреватели. Материалы для изготовления нагревателей

Непосредственно **нагреватель** – один из самых важных элементов печи, именно он осуществляет нагрев, имеет наибольшую температуру и определяет работоспособность нагревательной установки в целом. Поэтому нагреватели должны соответствовать ряду требований, которые приведены ниже.

Требования к нагревателям

Основные требования к нагревателям (материалам нагревателей):

1. Нагреватели должны обладать достаточной жаростойкостью (окалиностойкостью) и жаропрочностью. Жаропрочность - механическая прочность при высоких температурах. Жаростойкость - сопротивление металлов и сплавов газовой коррозии при высоких температурах (более подробно свойства жаростойкости и жаропрочности описаны на странице [“Жаропрочные сплавы и стали”](#)).
2. **Нагреватель** в электропечи должен быть сделан из материала, обладающего высоким удельным электрическим сопротивлением. Говоря простым языком, чем выше электрическое сопротивление материала, тем сильнее он нагревается. Следовательно, если взять материал с меньшим сопротивлением, то потребуется нагреватель большей длины и с меньшей площадью поперечного сечения. Не всегда в печи может быть размещен достаточно длинный нагреватель. Также стоит учитывать, что, *чем больше диаметр проволоки, из которой сделан нагреватель, тем дольше срок его службы*. Примерами материалов, обладающих высоким электрическим сопротивлением являются хромоникелевый сплав [нихром Х20Н80](#), [Х15Н60](#), железохромоалюминиевый сплав [фехраль Х23Ю5Т](#), которые относятся к прецизионным сплавам с высоким электрическим сопротивлением.
3. Малый температурный коэффициент сопротивления является существенным фактором при выборе материала для нагревателя. Это означает, что при изменении температуры электрическое сопротивление материала **нагревателя** меняется не сильно. Если температурный коэффициент электросопротивления велик, для включения печи в холодном состоянии приходится использовать трансформаторы, дающие в начальный момент пониженное напряжение.
4. Физические свойства материалов нагревателей должны быть постоянными. Некоторые материалы, например карборунд, который является неметаллическим нагревателем, с течением времени могут изменять свои физические свойства, в частности электрическое сопротивление, что усложняет условия их эксплуатации. Для стабилизации электрического сопротивления используют трансформаторы с большим количеством ступеней и диапазоном напряжений.
5. Металлические материалы должны обладать хорошими технологическими свойствами, а именно: пластичностью и свариваемостью, - чтобы из них можно было изготовить **проволоку, ленту**, а из ленты - сложные по конфигурации нагревательные элементы. Также **нагреватели** могут быть изготовлены из неметаллов. Неметаллические нагреватели прессуются или формуются, превращаясь в готовое изделие.

Материалы для изготовления нагревателей

Наиболее подходящими и самыми используемыми в производстве нагревателей для электропечей являются **прецизионные сплавы с высоким электрическим сопротивлением**. К ним относятся сплавы на основе хрома и никеля (**хромоникелевые**), железа, хрома и алюминия (**железохромоалюминиевые**). Марки и свойства данных сплавов рассмотрены в [ГОСТ 10994-74](#)

«Сплавы прецизионные. Марки». Представителями хромоникелевых сплавов является [нихром](#) марок Х20Н80, Х20Н80-Н (950-1200 °С), Х15Н60, Х15Н60-Н (900-1125 °С), железохромоалюминиевых – [фехраль](#) марок Х23Ю5Т (950-1400 °С), Х27Ю5Т (950-1350 °С), Х23Ю5 (950-1200 °С), Х15Ю5 (750-1000 °С). Также существуют железохромоникелевые сплавы - Х15Н60Ю3, Х27Н70Ю3.

Перечисленные выше сплавы обладают хорошими свойствами жаропрочности и жаростойкости, поэтому они могут работать при высоких температурах. Хорошую **жаростойкость** обеспечивает защитная пленка из окиси хрома, которая образуется на поверхности материала. Температура плавления пленки выше температуры плавления непосредственно сплава, она не растрескивается при нагреве и охлаждении.

Приведем сравнительную характеристику нихрома и фехрали.

Достоинства нихрома:

1. хорошие механические свойства как при низких, так и при высоких температурах;
2. сплав крипоустойчив;
3. имеет хорошие технологические свойства – пластичность и свариваемость;
4. хорошо обрабатывается;
5. не стареет, немагнитен.

Недостатки нихрома:

1. высокая стоимость никеля - одного из основных компонентов сплава;
2. более низкие рабочие температуры по сравнению с фехралью.

Достоинства фехрали:

1. более дешевый сплав по сравнению с нихромом, т.к. не содержит [никель](#);
2. обладает лучшей по сравнению с нихромом жаростойкостью, например, фехраль Х23Ю5Т может работать при температуре до 1400 °С (1400 °С - максимальная рабочая температура для нагревателя из проволоки Ø 6,0 мм и более; Ø 3,0 - 1350 °С; Ø 1,0 - 1225 °С; Ø 0,2 - 950 °С).

Недостатки фехрали:

1. хрупкий и непрочный сплав, данные негативные свойства особенно сильно проявляются после пребывания сплава при температуре большей 1000 °С;
2. т.к. фехраль имеет в своем составе железо, то данный сплав является магнитным и может ржаветь во влажной атмосфере при нормальной температуре;
3. имеет низкое сопротивление ползучести;
4. взаимодействует с шамотной футеровкой и окислами железа;
5. во время эксплуатации нагреватели из фехрали существенно удлиняются.

Также сравнение сплавов **фехраль** и **нихром** производится на странице [Х20Н80 - описание](#).

В последнее время разработаны сплавы типа Х15Н60Ю3 и Х27Н70Ю3, т.е. с добавлением 3% алюминия, что значительно улучшило жаростойкость сплавов, а наличие никеля практически исключило имеющиеся у железохромоалюминиевых сплавов недостатки. Сплавы Х15Н60Ю3, Х27Н60Ю3 не взаимодействуют с шамотом и окислами железа, достаточно хорошо обрабатываются, механически прочны, нехрупки. Максимальная рабочая температура сплава Х15Н60Ю3 составляет 1200 °С.

Помимо перечисленных выше сплавов на основе никеля, хрома, железа, алюминия для изготовления

нагревателей применяют и другие материалы: тугоплавкие металлы, а также неметаллы.

Среди неметаллов для изготовления нагревателей используют карборунд, дисилицид молибдена, уголь, графит. Нагреватели из карборунда и дисилицида молибдена используют в высокотемпературных печах. В печах с защитной атмосферой применяют угольные и графитовые нагреватели.

Среди тугоплавких материалов в качестве нагревателей могут использоваться [вольфрам](#), [молибден](#), тантал и ниобий. В высокотемпературных вакуумных печах и печах с защитной атмосферой применяются **нагреватели из молибдена и вольфрама**. Молибденовые нагреватели могут работать до температуры 1700 °С в вакууме и до 2200 °С – в защитной атмосфере. Такая разница температур обусловлена испарением молибдена при температурах выше 1700 °С в вакууме. Вольфрамовые нагреватели могут работать до 3000 °С. В особых случаях применяют нагреватели из тантала и ниобия.

Расчет нагревателей электрических печей

Обычно в качестве исходных данных для **расчета нагревателей электрических печей** выступают мощность, которую должны обеспечивать нагреватели, максимальная температура, которая требуется для осуществления соответствующего технологического процесса (отпуска, закалки, спекания и т.д.) и размеры рабочего пространства электрической печи. Если мощность печи не задана, то ее можно определить по эмпирическому правилу. В ходе расчета нагревателей требуется получить диаметр и длину (для проволоки) или площадь сечения и длину (для ленты), которые необходимы для **изготовления нагревателей**.

Также необходимо определить материал, из которого следует делать **нагреватели** (данный пункт в статье не рассматривается). В данной статье в качестве материала для нагревателей рассматривается хромоникелевый прецизионный сплав с высоким электрическим сопротивлением [нихром X20H80](#), который является одним из самых популярных при изготовлении нагревательных элементов.

Определение диаметра и длины нагревателя (нихромовой проволоки) для заданной мощности печи (простой расчет)

Пожалуй, наиболее простым вариантом **расчета нагревателей** из нихрома является выбор диаметра и длины [нихромовой проволоки](#) при заданной мощности нагревателя, питающего напряжения сети, а также температуры, которую будет иметь нагреватель. Несмотря на простоту расчета, в нем имеется одна особенность, на которую мы обратим внимание ниже.

Пример расчета диаметра и длины нагревательного элемента

Исходные данные:

Устройство мощностью $P = 800$ Вт; напряжение сети $U = 220$ В; температура нагревателя 800 °С. В качестве нагревательного элемента используется нихромовая проволока X20H80.

1. Сначала необходимо определить силу тока, которая будет проходить через нагревательный элемент:

$$I = P / U = 800 / 220 = 3,63 \text{ А.}$$

2. Теперь нужно найти сопротивление нагревателя:

$$R = U / I = 220 / 3,63 = 61 \text{ Ом;}$$

3. Исходя из значения полученной в п. 1 силы тока, проходящего через **нихромовый нагреватель**, нужно выбрать диаметр проволоки. И этот момент является важным. Если, например, при силе тока в 6 А использовать нихромовую проволоку диаметром 0,4 мм, то она сгорит. Поэтому, рассчитав силу тока, необходимо выбрать из таблицы соответствующее значение диаметра проволоки. В нашем случае для силы тока 3,63 А и температуры нагревателя 800 °С выбираем нихромовую проволоку с диаметром $d = 0,35$ мм и площадью поперечного сечения $S = 0,096$ мм².

Общее правило выбора диаметра проволоки можно сформулировать следующим образом: необходимо выбрать проволоку, у которой допустимая сила тока не меньше, чем расчетная сила тока, проходящего через нагреватель. *С целью экономии материала нагревателя следует выбирать проволоку с ближайшей большей (чем расчетная) допустимой силой тока.*

Таблица 1

Допустимая сила тока, проходящего через нагреватель из нихромовой проволоки, соответствующая определенным температурам нагрева проволоки, подвешенной горизонтально в спокойном воздухе нормальной температуры

Диаметр <u>нихромовой</u> <u>проволоки</u> , мм	Площадь поперечного сечения нихромовой проволоки, мм ²	Температура нагрева нихромовой проволоки, °С						
		200	400	600	700	800	900	1000
Максимальная допустимая сила тока, А								
5	19,6	52	83	105	124	146	173	206
4	12,6	37,0	60,0	80,0	93,0	110,0	129,0	151,0
3	7,07	22,3	37,5	54,5	64,0	77,0	88,0	102,0
2,5	4,91	16,6	27,5	40,0	46,6	57,5	66,5	73,0
2	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
1,8	2,54	10,0	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
1,6	2,01	8,6	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,5	1,77	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,4	1,54	7,25	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,3	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21,0	24,4	27,0
1,2	1,13	6,0	9,8	14,0	15,8	18,7	21,6	24,3
1,1	0,95	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1,0	0,785	4,85	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,9	0,636	4,25	6,7	9,35	10,45	12,3	14,5	16,5
0,8	0,503	3,7	5,7	8,15	9,15	10,8	12,3	14,0
0,75	0,442	3,4	5,3	7,55	8,4	9,95	11,25	12,85
0,7	0,385	3,1	4,8	6,95	7,8	9,1	10,3	11,8
0,65	0,342	2,82	4,4	6,3	7,15	8,25	9,3	10,75
0,6	0,283	2,52	4	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,55	0,238	2,25	3,55	5,1	5,8	6,75	7,6	8,7
0,5	0,196	2	3,15	4,5	5,2	5,9	6,75	7,7
0,45	0,159	1,74	2,75	3,9	4,45	5,2	5,85	6,75
0,4	0,126	1,5	2,34	3,3	3,85	4,4	5,0	5,7
0,35	0,096	1,27	1,95	2,76	3,3	3,75	4,15	4,75
0,3	0,085	1,05	1,63	2,27	2,7	3,05	3,4	3,85

0,25	0,049	0,84	1,33	1,83	2,15	2,4	2,7	3,1
0,2	0,0314	0,65	1,03	1,4	1,65	1,82	2,0	2,3
0,15	0,0177	0,46	0,74	0,99	1,15	1,28	1,4	1,62
0,1	0,00785	0,1	0,47	0,63	0,72	0,8	0,9	1,0

Примечание:

- если нагреватели находятся внутри нагреваемой жидкости, то нагрузку (допустимую силу тока) можно увеличить в 1,1 - 1,5 раза;
- при закрытом расположении нагревателей (например, в камерных электропечах) необходимо уменьшить нагрузки в 1,2 - 1,5 раза (меньший коэффициент берется для более толстой проволоки, больший - для тонкой).

4. Далее определим длину нихромовой проволоки.

$$R = \rho \cdot l / S,$$

где R - электрическое сопротивление проводника (нагревателя) [Ом], ρ - удельное электрическое сопротивление материала нагревателя [Ом · мм² / м], l - длина проводника (нагревателя) [мм], S - площадь поперечного сечения проводника (нагревателя) [мм²].

Таким образом, получим длину нагревателя:

$$l = R \cdot S / \rho = 61 \cdot 0,096 / 1,1 = 5,3 \text{ м.}$$

В данном примере в качестве нагревателя используется нихромовая проволока Ø 0,35 мм. В соответствии с [ГОСТ 12766.1-90](#) "Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия" номинальное значение удельного электрического сопротивления нихромовой проволоки марки Х20Н80 составляет 1,1 Ом · мм² / м ($\rho = 1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$), см. табл. 2.

Итогом расчетов является необходимая длина нихромовой проволоки, которая составляет 5,3 м, диаметр - 0,35 мм.

Таблица 2

Удельное электрическое сопротивление нихрома (номинальное значение) - по [ГОСТ 12766.1-90](#)

Марка сплава	Диаметр, мм	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{ном}}$, мкОм·м
Х20Н80-Н	от 0,1 до 0,5 включ.	1,08
	от 0,5 до 3,0 включ.	1,11
	Св. 3,0	1,13
Х15Н60, Х15Н60-Н	от 0,1 до 3,0 включ.	1,11
	Св. 3,0	1,12
Х23Ю5Т	Все диаметры	1,39

Определение диаметра и длины нагревателя (нихромовой проволоки) для заданной печи (подробный расчет)

Расчет, представленный в данном пункте, является более сложным, чем выше. Здесь мы учтем дополнительные параметры нагревателей, попытаемся разобраться с вариантами подключения нагревателей к сети трехфазного тока. Расчет нагревателя будем проводить на примере электрической печи. Пусть исходными данными являются внутренние размеры печи.

1. Первое, что необходимо сделать - посчитать объем камеры внутри печи. В данном случае возьмем $h = 490$ мм, $d = 350$ мм и $l = 350$ мм (высота, ширина и глубина соответственно). Таким образом, получаем объем $V = h \cdot d \cdot l = 490 \cdot 350 \cdot 350 = 60 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 = 60 \text{ л}$ (мера объема).

2. Далее необходимо определить мощность, которую должна выдавать печь. Мощность измеряется в Ваттах (Вт) и определяется по **эмпирическому правилу**: для электрической печи объемом 10 - 50 литров удельная мощность составляет 100 Вт/л (Ватт на литр объема), объемом 100 - 500 литров - 50 - 70 Вт/л. Возьмем для рассматриваемой печи удельную мощность 100 Вт/л. Таким образом мощность нагревателя электрической печи должна составлять $P = 100 \cdot 60 = 6000 \text{ Вт} = 6 \text{ кВт}$.

Стоит отметить, что при мощности 5-10 кВт **нагреватели** изготавливают, обычно, однофазными. При больших мощностях для равномерной загрузки сети нагреватели делают трехфазными.

3. Затем нужно найти силу тока, проходящего через нагреватель $I = P / U$, где P - мощность нагревателя, U - напряжение на нагревателе (между его концами), и сопротивление нагревателя $R = U / I$.

Здесь может быть два варианта подключения к электрической сети:

- к бытовой сети однофазного тока - тогда $U = 220 \text{ В}$;
- к промышленной сети трехфазного тока - $U = 220 \text{ В}$ (между нулевым проводом и фазой) или $U = 380 \text{ В}$ (между двумя любыми фазами).

Далее расчет будет проведен отдельно для однофазного и трехфазного подключения.

Бытовая сеть однофазного тока

$$I = P / U = 6000 / 220 = 27,3 \text{ А} - \text{ток проходящий через нагреватель.}$$

Затем необходимо определить сопротивление нагревателя печи.

$$R = U / I = 220 / 27,3 = 8,06 \text{ Ом.}$$

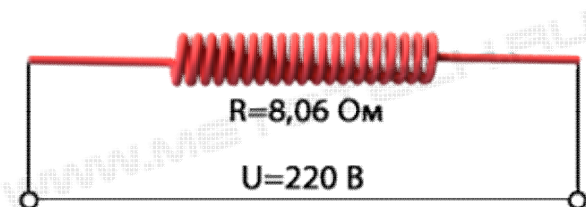


Рисунок 1 Проволочный нагреватель в сети однофазного тока

Искомые значения диаметра проволоки и ее длины будут определены в п. 5 данного параграфа.

Промышленная сеть трехфазного тока

При данном типе подключения нагрузка распределяется равномерно на три фазы, т.е. по $6 / 3 = 2 \text{ кВт}$ на фазу. Таким образом, нам требуется 3 нагревателя. Далее необходимо выбрать способ подключения непосредственно нагревателей (нагрузки). Способов может быть 2: “ЗВЕЗДА” или “ТРЕУГОЛЬНИК”.

Стоит заметить, что в данной статье формулы для расчета силы тока (I) и сопротивления (R) для трехфазной сети записаны не в классическом виде. Это сделано для того, чтобы не усложнять изложение материала по расчету нагревателей электротехническими терминами и определениями

(например, не упоминаются фазные и линейные напряжения и токи и соотношения между ними). С классическим подходом и формулами расчета трехфазных цепей можно ознакомиться в специализированной литературе. В данной статье некоторые математические преобразования, проведенные над классическими формулами, скрыты от читателя, и на конечный результат это не оказывает никакого влияния.

При подключении типа “ЗВЕЗДА” нагреватель подключается между фазой и нулем (см. рис. 2). Соответственно, напряжение на концах нагревателя будет $U = 220$ В.

Ток, проходящий через нагреватель -

$$I = P / U = 2000 / 220 = 9,10 \text{ А.}$$

Сопротивление одного нагревателя -

$$R = U / I = 220 / 9,10 = 24,2 \text{ Ом.}$$

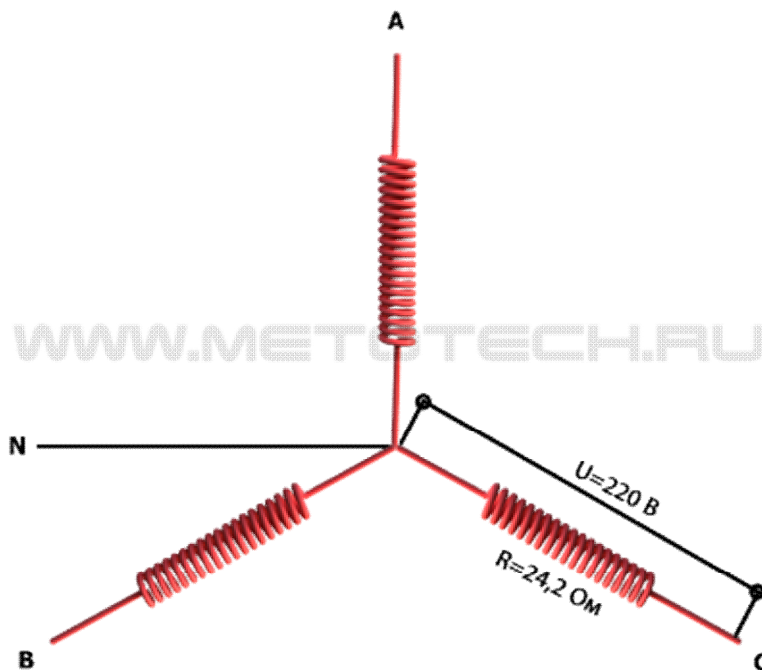


Рисунок 2 Проволочный нагреватель в сети трехфазного тока. Подключение по схеме "ЗВЕЗДА"

При подключении типа “ТРЕУГОЛЬНИК” нагреватель подключается между двумя фазами (см. рис. 3). Соответственно, напряжение на концах нагревателя будет $U = 380$ В.

Ток, проходящий через нагреватель -

$$I = P / U = 2000 / 380 = 5,26 \text{ А.}$$

Сопротивление одного нагревателя -

$$R = U / I = 380 / 5,26 = 72,2 \text{ Ом.}$$

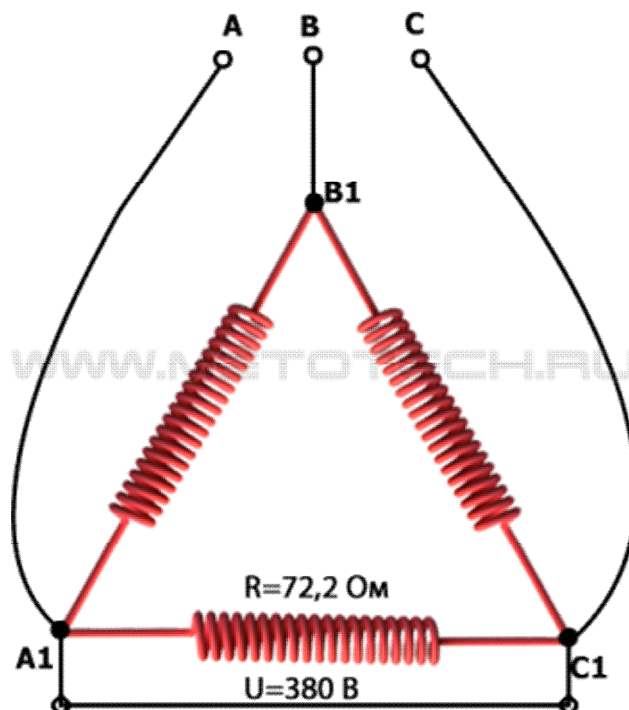


Рисунок 3 Проволочный нагреватель в сети трехфазного тока. Подключение по схеме "ТРЕУГОЛЬНИК"

4. После определения сопротивления нагревателя при соответствующем подключении к электрической сети **необходимо подобрать диаметр и длину проволоки.**

При определении указанных выше параметров необходимо анализировать **удельную поверхностную мощность нагревателя**, т.е. мощность, которая выделяется с единицы площади. Поверхностная мощность нагревателя зависит от температуры нагреваемого материала и от конструктивного выполнения нагревателей.

Пример

Из предыдущих пунктов расчета (см. п. 3 данного параграфа) нам известно сопротивление нагревателя. Для 60 литровой печи при однофазном подключении оно составляет $R = 8,06$ Ом. В качестве примера возьмем **проволоку нихромовую Х20Н80** диаметром 1 мм. Тогда, чтобы получить требуемое сопротивление, необходимо $l = R / \rho = 8,06 / 1,4 = 5,7$ м нихромовой проволоки, где ρ - номинальное значение электрического сопротивления 1 м проволоки по [ГОСТ 12766.1-90](#), [Ом/м]. Масса данного отрезка проволоки из нихрома составит $m = l \cdot \mu = 5,7 \cdot 0,007 = 0,0399$ кг = 40 г, где μ - масса 1 м проволоки. Теперь необходимо определить площадь поверхности отрезка проволоки длиной 5,7 м. $S = l \cdot \pi \cdot d = 570 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 179$ см², где l - длина проволоки [см], d - диаметр проволоки [см]. Таким образом, с площади 179 см² должно выделяться 6 кВт. Решая простую пропорцию, получаем, что с 1 см² выделяется мощность $\beta = P / S = 6000 / 179 = 33,5$ Вт, где β - поверхностная мощность нагревателя.

Полученная поверхностная мощность слишком велика. **Нагреватель** расплавится, если нагреть его до температуры, которая обеспечила бы полученное значение поверхностной мощности. Данная температура будет выше температуры плавления материала нагревателя.

Приведенный пример является демонстрацией неправильного выбора диаметра проволоки, которая будет использоваться для изготовления нагревателя. В п. 5 данного параграфа будет приведен пример с правильным подбором диаметра.

Для каждого материала в зависимости от требуемой температуры нагрева определено допустимое значение поверхностной мощности. Оно может определяться с помощью специальных таблиц или графиков. В данных расчетах используются таблицы.

Для **высокотемпературных печей** (при температуре более 700 – 800 °С) допустимая поверхностная мощность, Вт/м², равна $\beta_{дон} = \beta_{эф} \cdot \alpha$, где $\beta_{эф}$ – поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры теплопринимающей среды [Вт / м²], α – коэффициент эффективности излучения. $\beta_{эф}$ выбирается по таблице 3, α - по таблице 4.

Если **печь низкотемпературная** (температура менее 200 – 300 °С), то допустимую поверхностную мощность можно считать равной $(4 - 6) \cdot 10^4$ Вт/м².

Таблица 3

Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры теплопринимающей среды

Температура теплопринимающей поверхности, °С	$\beta_{эф}$, Вт/см ² при температуре <u>нагревателя</u> , °С												
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	
100	6,1	7,3	8,7	10,3	12,5	14,15	16,4	19,0	21,8	24,9	28,4	36,3	
200	5,9	7,15	8,55	10,15	12,0	14,0	16,25	18,85	21,65	24,75	28,2	36,1	
300	5,65	6,85	8,3	9,9	11,7	13,75	16,0	18,6	21,35	24,5	27,9	35,8	
400	5,2	6,45	7,85	9,45	11,25	13,3	15,55	18,1	20,9	24,0	27,45	35,4	
500	4,5	5,7	7,15	8,8	10,55	12,6	14,85	17,4	20,2	23,3	26,8	34,6	
600	3,5	4,7	6,1	7,7	9,5	11,5	13,8	16,4	19,3	22,3	25,7	33,7	
700	2	3,2	4,6	6,25	8,05	10,0	12,4	14,9	17,7	20,8	24,3	32,2	
800	-	1,25	2,65	4,2	6,05	8,1	10,4	12,9	15,7	18,8	22,3	30,2	
850	-	-	1,4	3,0	4,8	6,85	9,1	11,7	14,5	17,6	21,0	29,0	
900	-	-	-	1,55	3,4	5,45	7,75	10,3	13	16,2	19,6	27,6	
950	-	-	-	-	1,8	3,85	6,15	8,65	11,5	14,5	18,1	26,0	
1000	-	-	-	-	-	2,05	4,3	6,85	9,7	12,75	16,25	24,2	
1050	-	-	-	-	-	-	2,3	4,8	7,65	10,75	14,25	22,2	
1100	-	-	-	-	-	-	-	2,55	5,35	8,5	12,0	19,8	
1150	-	-	-	-	-	-	-	-	2,85	5,95	9,4	17,55	
1200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,15	6,55	14,55	
1300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,95	

Таблица 4

Значение коэффициента эффективности излучения

Размещение нагревателей	Коэффициент α
Проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки	0,16 - 0,24
Проволочные спирали на полочках в трубках	0,30 - 0,36
Проволочные зигзагообразные (стержневые) нагреватели	0,60 - 0,72
Ленточные зигзагообразные нагреватели	0,38 - 0,44
Ленточные профилированные (ободовые) нагреватели	0,56 - 0,7

Предположим, что температура нагревателя 1000 °С, и хотим нагреть заготовку до температуры 700 °С. Тогда по таблице 3 подбираем $\beta_{эф} = 8,05 \text{ Вт/см}^2$, $\alpha = 0,2$, $\beta_{дон} = \beta_{эф} \cdot \alpha = 8,05 \cdot 0,2 = 1,61 \text{ Вт/см}^2 = 1,61 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$.

5. После определения допустимой поверхностной мощности нагревателя необходимо **найти его диаметр** (для проволочных нагревателей) или **ширину и толщину** (для ленточных нагревателей), а также **длину**.

Диаметр проволоки можно определить по следующей формуле:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \beta_{дон}}}, \text{ где}$$

d - диаметр проволоки, [м]; P - мощность нагревателя, [Вт]; U - напряжение на концах нагревателя, [В]; $\beta_{дон}$ - допустимая поверхностная мощность нагревателя, [Вт/м²]; ρ_t - удельное сопротивление материала нагревателя при заданной температуре, [Ом·м].

$\rho_t = \rho_{20} \cdot k$, где ρ_{20} - удельное электрическое сопротивление материала нагревателя при 20 °С, [Ом·м] k - поправочный коэффициент для расчета изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры (по [ГОСТ 12766.1-90](#)).

Длину проволоки можно определить по следующей формуле:

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{дон}^2}}, \text{ где}$$

l - длина проволоки, [м].

Подберем диаметр и длину проволоки из **нихрома Х20Н80**. Удельное электрическое сопротивление материала нагревателя составляет

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot k = 1,13 \cdot 10^{-6} \cdot 1,025 = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом·м.}$$

Бытовая сеть однофазного тока

Для 60 литровой печи, подключенной к бытовой сети однофазного тока, из предыдущих этапов расчета известно, что мощность печи составляет $P = 6000 \text{ Вт}$, напряжение на концах нагревателя - $U = 220 \text{ В}$, допустимая поверхностная мощность нагревателя $\beta_{дон} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$. Тогда получаем

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \beta_{дон}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 6000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00279 \text{ м} \approx 2,79 \text{ мм}$$

Полученный размер необходимо округлить до ближайшего большего стандартного. Стандартные размеры для проволоки из нихрома и фехрали можно найти в [ГОСТ 12766.1-90](#), Приложение 2, Таблица 8. В данном случае, ближайшим большим стандартным размером является $\varnothing 2,8 \text{ мм}$. Диаметр нагревателя $d = 2,8 \text{ мм}$.

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{доп}^2}} = \sqrt[3]{\frac{6000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx 42,81 \text{ м} \approx 43 \text{ м}$$

Длина нагревателя $l = 43$ м.

Также иногда требуется определить массу необходимого количества проволоки.

$m = l \cdot \mu$, где m - масса отрезка проволоки, [кг]; l - длина проволоки, [м]; μ - удельная масса (масса 1 метра проволоки), [кг/м].

В нашем случае масса нагревателя $m = l \cdot \mu = 43 \cdot 0,052 = 2,3$ кг.

Данный расчет дает минимальный диаметр проволоки, при котором она может быть использована в качестве нагревателя при заданных условиях. С точки зрения экономии материала такой расчет является оптимальным. При этом также может быть использована проволока большего диаметра, но тогда ее количество возрастет.

Проверка

Результаты расчета могут быть проверены следующим способом. Был получен диаметр проволоки 2,8 мм. Тогда нужна нам длина составит

$l = R / (\rho \cdot k) = 8,06 / (0,179 \cdot 1,025) = 43$ м, где l - длина проволоки, [м]; R - сопротивление нагревателя, [Ом]; ρ - номинальное значение электрического сопротивления 1 м проволоки, [Ом/м]; k - поправочный коэффициент для расчета изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры.

Данное значение совпадает со значением, полученным в результате другого расчета.

Теперь необходимо проверить, не превысит ли поверхностная мощность выбранного нами нагревателя допустимую поверхностную мощность, которая была найдена в п. 4. $\beta = P / S = 6000 / (3,14 \cdot 4300 \cdot 0,28) = 1,59$ Вт/см². Полученное значение $\beta = 1,59$ Вт/см² не превышает $\beta_{доп} = 1,6$ Вт/см².

Итоги

Таким образом, для нагревателя потребуется 43 метра нихромовой проволоки Х20Н80 диаметром 2,8 мм, это составляет 2,3 кг.

Промышленная сеть трехфазного тока

Также можно найти диаметр и длину проволоки, необходимой для изготовления нагревателей печи, подключенной к сети трехфазного тока.

Как описано в п. 3, на каждый из трех нагревателей приходится по 2 кВт мощности. Найдем диаметр, длину и массу одного нагревателя.

Подключение типа “ЗВЕЗДА” (см. рис. 2)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \beta_{доп}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00134 \text{ м} \approx 1,34 \text{ мм}$$

В данном случае, ближайшим большим стандартным размером является $\varnothing 1,4$ мм. Диаметр нагревателя $d = 1,4$ мм.

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{доп}^2}} = \sqrt[3]{\frac{2000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx 29,69 \text{ м} \approx 30 \text{ м}$$

Длина одного нагревателя $l = 30$ м.

Масса одного нагревателя $m = l \cdot \mu = 30 \cdot 0,013 = 0,39$ кг.

Проверка

Был получен диаметр проволоки 1,4 мм. Тогда нужная нам длина составит

$$l = R / (\rho \cdot k) = 24,2 / (0,714 \cdot 1,025) = 33 \text{ м.}$$

Данное значение практически совпадает со значением, полученным в результате другого расчета.

Поверхностная мощность составит $\beta = P/S = 2000 / (3,14 \cdot 3000 \cdot 0,14) = 1,52$ Вт/см², она не превышает допустимую.

Итоги

Для трех нагревателей, подключенных по схеме “ЗВЕЗДА”, потребуется

$$l = 3 \cdot 30 = 90 \text{ м проволоки, что составляет}$$

$$m = 3 \cdot 0,39 = 1,2 \text{ кг.}$$

Подключение типа “ТРЕУГОЛЬНИК” (см. рис. 3)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \beta_{доп}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 380^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00093 \text{ м} \approx 0,93 \text{ мм}$$

В данном случае, ближайшим большим стандартным размером является $\varnothing 0,95$ мм. Диаметр нагревателя $d = 0,95$ мм.

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{доп}^2}} = \sqrt[3]{\frac{2000 \cdot 380^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx 42,74 \text{ м} \approx 43 \text{ м}$$

Длина одного нагревателя $l = 43$ м.

Масса одного нагревателя $m = l \cdot \mu = 43 \cdot 0,006 = 0,258$ кг.

Проверка

Был получен диаметр проволоки 0,95 мм. Тогда нужная нам длина составит

$$l = R / (\rho \cdot k) = 72,2 / (1,55 \cdot 1,025) = 45 \text{ м.}$$

Данное значение практически совпадает со значением, полученным в результате другого расчета.

Поверхностная мощность составит $\beta = P/S = 2000 / (3,14 \cdot 4300 \cdot 0,095) = 1,56$ Вт/см², она не превышает допустимую.

Итоги

Для трех нагревателей, подключенных по схеме “ТРЕУГОЛЬНИК”, потребуется

$$l = 3 \cdot 43 = 129 \text{ м проволоки, что составляет}$$

$$m = 3 \cdot 0,258 = 0,8 \text{ кг.}$$

Если сравнить 2 рассмотренных выше варианта подключения нагревателей к сети трехфазного тока, то можно заметить, что **для “ЗВЕЗДЫ” требуется проволока большего диаметра, чем для “ТРЕУГОЛЬНИКА”** (1,4 мм против 0,95 мм), чтобы обеспечить заданную мощность печи 6 кВт. При этом **требуемая длина нихромовой проволоки при подключении по схеме “ЗВЕЗДА” меньше длины проволоки при подключении типа “ТРЕУГОЛЬНИК”** (90 м против 129 м), а **требуемая масса, наоборот, больше** (1,2 кг против 0,8 кг).

Для эксплуатации рассчитанной нихромовой проволоки из нее необходимо сделать **спираль**. Диаметр **спирали нагревателя** принимают равным: $D = (4 \div 6) \cdot d$ - для хромоалюминиевых сплавов, $D = (7 \div 10) \cdot d$ - для хромоникелевых сплавов, где D - диаметр спирали [мм], d - диаметр проволоки [мм]. Для устранения местных перегревов спираль необходимо растянуть, чтобы расстояние между витками было в 1,5-2 раза больше диаметра проволоки.

Список литературы

- Дьяков В.И. "Типовые расчеты по электрооборудованию".
- Жуков Л.Л., Племянникова И.М., Миронова М.Н., Баркая Д.С., Шумков Ю.В. "Сплавы для нагревателей".
- Сокунов Б.А., Грובה Л.С. "Электротермические установки (электрические печи сопротивления)".
- Фельдман И.А., Гутман М.Б., Рубин Г.К., Шадрин Н.И. "Расчет и конструирование нагревателей электропечей сопротивления".
- <http://www.horss.ru/h6.php?p=45>
- <http://www.electromonter.info/advice/nichrom.html>

Расчет нагревательных приборов

- Основная задача при расчете электрического нагревательного прибора с отдельными нагревателями сводится к следующему.
- Требуется нагреть заданное количество материала известной теплоемкости с какой-либо начальной температурой до определенной конечной температуры в заданное время. Исходя из этих условий находят сечение и длину нагревателей, питаемых током известного напряжения. Расчет обычно начинают с определения полезного количества теплоты, кДж, необходимой для повышения температуры нагреваемого материала до заданной величины без учета тепловых потерь
- $Q_{\text{пол}} = cm(t_k - t_n)$,
- где m - масса нагреваемого материала, кг; t_n - начальная температура материала, °С; t_k - конечная температура материала, °С; c - удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°С) (табл. 15).

Таблица 15. Удельная теплоемкость некоторых материалов в интервале температур 0÷100°С

Материал	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)	Материал	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С)
Алюминий	0,91	Сталь	0,5
Латунь	0,38	Цинк	0,4
Медь	0,39	Вода	4,2
Нейзильбер	0,4	Дерево	0,24-0,27
Никель	0,45	Строительный кирпич	0,92

Олово	0,23	Сухой песок	0,71-0,92
Свинец	0,13	Х/б ткань	0,25

- Определив полезное количество теплоты, можно найти общее количество теплоты, кДж, необходимой для нагрева изделия до заданной температуры с учетом излучения теплоты в окружающую среду, $Q_{общ} = Q_{пол}/\eta$, где η - КПД нагревательного прибора (табл. 16).

Таблица 16. КПД электрических нагревательных приборов

Электрические нагревательные приборы	КПД η
Электрические печи сопротивления (для термообработки)	0,6-0,85
Кастрюли и чайники	0,65-0,8
Аккумулирующие электрические водонагреватели	0,85-0,95
Электроплитки закрытого типа	0,6-0,8
Электронагрев форм для прессования	0,5-0,7
Электроплитки открытого типа	0,56

- Мощность, кВт, нагревательного прибора определяют по формуле $P = (0,00028 \cdot k \cdot Q_{общ})/t$, где k - коэффициент запаса (1,1÷1,3), учитывающий уменьшение напряжения сети, старение нагревательных элементов, увеличение теплоемкости нагреваемого изделия при повышении температуры; t - время нагрева изделий, ч.
- При мощности 5÷10 кВт нагреватели изготавливают обычно однофазными. При больших мощностях для равномерной загрузки сети нагреватели лучше делать трехфазными.
- Затем по технологическим условиям нагрева выбирают материал для нагревательных элементов по табл. 17.

Таблица 17. Проводниковые сплавы высокого сопротивления

Марка сплава	Максимальная температура, °С	Удельное сопротивление при 20°С, Ом·м	Лента холоднокатаная		Проволока	
			толщина, мм	ширина, мм	холодно-катаная	горяче-катаная
X23Ю5	1200	$1,30-1,40 \times 10^{-6}$			0,3-7,5	
X23Ю5Т	1400	$1,34-1,45 \times 10^{-6}$			0,3-7,5	
X27Ю5Т	1350	$1,37-1,47 \times 10^{-6}$	0,2-3,2	6-80	0,5-5,5	
X15Ю5	1000	$1,24-1,34 \times 10^{-6}$			0,2-7,5	6-12
XН70Ю	1200	$1,25-1,35 \times 10^{-6}$			1,0-7,0	
X15Н60	950	$1,06-1,17 \times 10^{-6}$			0,3-7,5	
X15Н60·Н	1125	$1,04-1,17 \times 10^{-6}$	0,1-3,2	6-250	0,1-7,5	
X20Н80·Н	1200	$1,04-1,15 \times 10^{-6}$			0,1-7,5	

- Расчет нагревательных элементов начинается с выбора допустимой удельной поверхностной мощности, т. е. мощности, выделяемой с единицы внешней поверхности нагревателя. Эта величина показывает, какое количество тепла может быть отдано с единицы поверхности нагревателя. Удельная поверхностная мощность зависит от температуры нагреваемого материала, а также от конструктивного выполнения нагревателей.
- Для высокотемпературных печей (при температуре более 700÷800°С) допустимая удельная поверхностная мощность, Вт/м², равна $\beta_{дон} = \beta_{эф} \alpha$, где $\beta_{эф}$ - поверхностная мощность

нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды (принимается по табл. 18), α - коэффициент эффективности излучения (принимается по табл. 19).

Таблица 18. Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды

Температура тепловоспринимающей поверхности, °С	$\beta_{\text{эф}} \cdot 10^4$, Вт/см ³ , при температуре нагревателя, °С											
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
100	6,1	7,3	8,7	10,3	12,5	14,15	16,4	19	21,8	24,9	28,4	36,3
200	5,9	7,15	8,55	10,15	12	14	16,25	18,85	21,65	24,75	28,2	36,1
300	5,65	6,85	8,3	9,9	11,7	13,75	16	18,6	21,35	24,5	27,9	35,8
400	5,2	6,45	7,85	9,45	11,25	13,3	15,55	18,1	20,9	24	27,45	35,4
500	4,5	5,7	7,15	8,8	10,55	12,6	14,85	17,4	20,2	23,2	26,8	34,6
600	3,5	4,7	6,1	7,7	9,5	11,5	13,8	16,4	19,3	22,3	25,7	33,7
700	2	3,2	4,6	6,25	8,05	10	12,4	14,9	17,7	20,8	24,3	32,2
800	-	1,25	2,65	4,2	6,05	8,1	10,4	12,9	15,7	18,8	22,3	30,2
850	-	-	1,4	3	4,8	6,85	9,1	11,7	14,5	17,6	21	29
900	-	-	-	1,55	3,4	5,45	7,75	10,3	13	16,2	19,6	27,6
950	-	-	-	-	1,8	3,85	6,15	8,65	11,5	14,5	18,1	26
1000	-	-	-	-	-	2,05	4,3	6,85	9,7	12,75	16,25	24,2
1050	-	-	-	-	-	-	2,3	4,8	7,65	10,75	14,25	22,2
1100	-	-	-	-	-	-	-	2,55	5,35	8,5	12	19,8
1150	-	-	-	-	-	-	-	-	2,85	5,95	9,4	17,55
1200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,15	6,55	14,55
1300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,95

Таблица 19. Значение коэффициента эффективности излучения

Размещение нагревателей	Коэффициент α
Проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки	0,16-0,24
Проволочные спирали на полочках в трубках	0,3-0,36
Проволочные зигзагообразные (стержневые) нагреватели	0,6-0,72
Ленточные зигзагообразные нагреватели	0,38-0,44
Ленточные профилированные (ободовые) нагреватели	0,56-0,7

- Для низкотемпературных печей (температура менее 200÷300°С) допустимую поверхностную мощность можно принимать равной $(4\div 6) \cdot 10^4$ Вт/м². После выбора материалов и допустимой удельной поверхностной мощности расчет нагревательных элементов сводится к определению их размеров.

- Диаметр, м, нагревателя круглого сечения

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 \beta_{\text{ном}}}}$$

- где P - мощность нагревателей, Вт; U - напряжение нагревателей, В; $\pi = 3,14$; ρ_t - удельное сопротивление нагревательных элементов при различной температуре нагрева:

- $\rho_t = \rho_{20K} \cdot \kappa$,
- где κ - поправочный коэффициент, который можно принимать для жаростойких и жаропрочных сплавов в интервале температур от 20 до 1400°C равным 1,01÷1,1.
- Длина, м, круглого нагревателя

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\pi\rho_t\beta_{\text{ном}}^2}}$$

- Толщина, м, ленты нагревательного элемента прямоугольного сечения

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_t P^2}{m(m+1)U^2\beta_{\text{доп}}^2}}$$

- где $m = b/a = (5 \div 15)$, b - ширина ленты нагревательного элемента, м.
- Длина, м, нагревателя, изготовленного из материала прямоугольного сечения с отношением сторон m , равна

$$l = \sqrt[3]{\frac{2,5PU^2m}{(m+1)\rho_t\beta_{\text{доп}}^2}}$$

- Расчет длины можно упростить, если выбрать стандартные размеры диаметра или прямоугольного сечения нагревателя:

$$l = \frac{R_{\phi} s}{\rho_t}$$

- где s - поперечное сечение нагревателя, мм²; R_{ϕ} - сопротивление, Ом, нагревателя одной фазы:

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{P_{\phi} \cdot 10^3}$$

- где P_{ϕ} - мощность одной фазы нагревателя, кВт.
- Диаметр спирали нагревателя принимают: для хромоалюминиевых сплавов $D = (4 \div 6)d$; для нихромов и его сплавов $D = (7 \div 10)d$.
- Для устранения местных перегревов спираль необходимо растянуть, чтобы расстояние между витками было в 1,5÷2 раза больше диаметра проволоки.
- **• Определение размеров нагревательных элементов из круглой нихромовой проволоки.**
- Определяется сила тока, А, нагревательного элемента по формулам:

для однофазного тока	для трехфазного тока
$I = \frac{P \cdot 1000}{U}$,	$I = \frac{P \cdot 1000}{\sqrt{3}U}$,

- где U - линейное напряжение, В; P - мощность нагревателей, кВт.
- По силе тока нагревательного прибора и **табл. 21, 22** определяют сечение нагревателей из нихромовой проволоки, а затем по ранее приведенным формулам и их длину l .

Таблица 21. Нагрузки, соответствующие определенным температурам нагрева

Таблица 22. Нагрузки, соответствующие определенным температурам нагрева нихромовой проволоки,

нихромовой проволоки, намотанной на керамику							подвешенной горизонтально в спокойном воздухе нормальной температуры								
Диаметр проволоки , мм ²	Сечение , мм ²	Температура нагрева, °С					Диаметр проволоки , мм	Сечение , мм ²	Температура нагрева, °С						
		200	400	600	800	1000			Нагрузка, А						
							5	19,6	52	83	105	124	146	173	206
							4	12,6	37	60	80	93	110	129	151
3	7,07	11	22	34,6	50	60	3	7,07	22,3	37,5	54,5	64	77	88	102
2	3,14	6,4	12,1	18,4	25,5	30,5	2,5	4,91	16,6	27,5	40	46,6	57,5	66,5	73
1,5	1,77	4,5	8,4	12,2	16,6	19,7	2	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51
1	0,785	2,8	4,8	6,9	9,3	11,4	1,8	2,54	10	16,9	24,9	29	33,1	39	43,2
0,9	0,636	2,3	4,1	5,9	7,9	9,9	1,6	2,01	8,6	14,4	21	24,5	28	32,9	36
0,8	0,503	1,9	3,5	4,9	6,6	8,4	1,5	1,77	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30	33
0,7	0,385	1,5	2,9	4	5,4	7	1,4	1,54	7,2	12,5	17,4	20	23,3	27	30
0,6	0,342	1,2	2,3	3,2	4,3	5,6	1,3	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21	24,4	27
0,5	0,196	0,9	1,7	2,5	3,3	4,3	1,2	1,13	6	9,8	14	15,8	18,7	21,6	24,3
0,4	0,126	0,7	1,2	1,8	2,4	3,1	1,1	0,9	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
0,3	0,085	0,4	0,8	1,1	1,6	2	1	0,785	4,8	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,2	0,0314	0,3	0,5	0,7	1	1,3	0,9	0,636	4,2	6,7	9,3	10,4	12,3	14,5	16,5
							0,8	0,503	3,7	5,7	8,1	9,15	10,8	12,3	14
							0,75	0,442	3,4	5,3	7,5	8,4	9,95	11,2	12,8
							0,7	0,385	3,1	4,8	6,9	7,8	9,1	10,3	11,8
							0,65	0,332	2,8	4,4	6,3	7,15	8,25	9,3	10,7
							0,6	0,342	2,5	4	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
							0,55	0,238	2,2	3,5	5,1	5,8	6,75	7,6	8,7
							0,5	0,196	2	3,1	4,5	5,2	5,9	6,75	7,7
							0,45	0,159	1,7	2,7	3,9	4,45	5,2	5,85	6,75
							0,4	0,126	1,5	2,3	3,3	3,85	4,4	5	5,7

Примечания:

1. Если нагреватели находятся внутри нагреваемой жидкости, нагрузку можно увеличить в 1,1-1,5 раза.

2. При закрытом расположении нагревателей (например, в камерных электропечах) необходимо уменьшить нагрузки в 1,2-1,5 раза. Меньший коэффициент берется для более толстой проволоки, больший - для тонкой проволоки.

				4					
0,35	0,096	1,2 7	1,9 5	2,7 6	3,3	3,75	4,15	4,75	
0,3	0,085	1,0 5	1,6 3	2,2 7	2,7	3,05	3,4	3,85	
0,25	0,049	0,8 4	1,3 3	1,8 3	2,15	2,4	2,7	3,1	
0,2	0,0314	0,6 5	1,0 3	1,4	1,65	1,82	2	2,3	
0,15	0,0177	0,4 6	0,7 4	0,9 9	1,15	1,28	1,4	1,62	
0,1	0,00785	0,1 7	0,4 7	0,6 3	0,72	0,8	0,9	1	

•

• Пример

- Определить мощность водонагревателя, сечение и длину нагревательных элементов для нагрева воды до 100°C, если масса воды 30 кг. Время нагрева 0,5 ч.
- Решение
- 1. Количество теплоты, требуемое для нагрева воды, $Q_{\text{потр}} = cm(t_{\text{к}}^0 - t_{\text{н}}^0) = 4,2 \cdot 30 \cdot (100 - 20) = 10080$ кДж.
- 2. Общее количество теплоты с учетом потерь $Q_{\text{общ}} = Q_{\text{потр}} / \eta = 10080 / 0,5 = 6,9$ кВт = 11200 кДж.
- 3. Мощность нагревателей $P = 0,00028 \text{к} Q_{\text{общ}} / t = 0,00028 \cdot 1,1 \times 11200 / 0,5 = 6,9$ кВт = 6900 Вт.
- 4. Принимают, что водонагреватель подключен к сети однофазного тока напряжением 220 В, нагреватель Х20Н80-Н, допустимая удельная поверхностная мощность $\beta_{\text{доп}} = 6 \cdot 10^4$ Вт/м², тогда диаметр нагревателя

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 \beta_{\text{ном}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,13 \cdot 6900^2}{10^6 \cdot 3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 6 \cdot 10^4}} = 0,00195 \text{ м.}$$

- $\rho_t = \rho_t \cdot \text{к} = 1,07 \cdot 10^{-6} \cdot 1,07 = 1,13 \cdot 10^{-6}$.
- Выбирают по **табл. 20** ближайший диаметр - 2 мм,

Таблица 20. Стандартные размеры проволок и лент из разных сплавов

Диаметр проволоки, мм	Размеры сечения ленты, мм	Размеры сечения ленты, мм
2	2×10	2,2×30
2,2	1,5×15	2,5×30
2,5	2×15	3×30
2,8	2,2×20	2,2×36
3,2	2,5×20	2,5×36
3,6	3×20	2,2×40
4	2,2×25	2,5×40
4,5	2,5×25	3,0×40
5	3×25	-

- 5. Длина нагревателей

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\pi^2\rho_l\beta_{\text{дон}}^2}} = \sqrt[3]{\frac{10^6 \cdot 6900 \cdot 220^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1,13^2 (6 \cdot 10^4)^2}} = 19 \text{ м.}$$

Нихромовая спираль - расчет

При намотке **спирали из нихрома** для нагревательных приборов эту операцию зачастую выполняют "на глазок", а затем, включая спираль в сеть, по нагреву нихромового провода подбирают требуемое количество витков. Обычно такая процедура занимает много времени, да и нихром расходуется попусту.

Чтобы рационализировать эту работу при использовании **нихромовой спирали** на напряжение 220 В, предлагаю воспользоваться данными приведенными в таблице, из расчета, что удельное сопротивление нихрома $\rho = (0,2 \cdot \text{мм}^2 / \text{м}) \cdot \text{С}$. С ее помощью можно быстро определить длину намотки виток к витку в зависимости от толщины нихромового провода и диаметра стержня, на который наматывается **нихромовая спираль**. Пересчитать длину **спирали из нихрома** на другое напряжение нетрудно, используя простую математическую пропорцию.

Длина нихромовой спирали в зависимости от диаметра нихрома и диаметра стержня															
Ø нихрома 0,2 мм		Ø нихрома 0,3 мм		Ø нихрома 0,4 мм		Ø нихрома 0,5 мм		Ø нихрома 0,6 мм		Ø нихрома 0,7 мм		Ø нихрома 0,8 мм		Ø нихрома 0,9 мм	
Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см	Ø стержня, мм	длина спирали, см
1,5	49	1,5	59	1,5	77	2	64	2	76	2	84	3	68	3	78
2	30	2	43	2	68	3	46	3	53	3	64	4	54	4	72
3	21	3	30	3	40	4	36	4	40	4	49	5	46	6	68
4	16	4	22	4	28	5	30	5	33	5	40	6	40	8	52
5	13	5	18	5	24	6	26	6	30	6	34	8	31		
				6	20			8	22	8	26	10	24		

Например, требуется определить длину **нихромовой спирали** на напряжение 127 В из провода толщиной 0,3 мм, стержень для намотки Ø 4 мм. Из таблицы видно, что длина такой спирали на напряжение 220 В будет равна 22 см. Составим простое соотношение:

$$\begin{aligned} 220 \text{ В} &- 22 \text{ см} \\ 127 \text{ В} &- X \text{ см} \end{aligned}$$

тогда:

$$X = 127 \cdot 22 / 220 = 12,7 \text{ см}$$

Намотав нихромовую спираль, подключите ее, не обрезая, к источнику напряжения и убедитесь в правильности намотки. У закрытых спиралей длину намотки увеличивают на 1/3 значения, приведенного в таблице.

Теоретический вес нихрома Х20Н80 (проволока и лента)

В данной таблице приведена теоретическая масса 1 метра нихромовой проволоки и ленты. Она изменяется в зависимости от размеров продукции.

Диаметр, типоразмер, мм	Плотность (удельный вес), г/см ³	Площадь сечения, мм ²	Масса 1 м, кг
Ø 0,4	8,4	0,126	0,001
Ø 0,5	8,4	0,196	0,002
Ø 0,6	8,4	0,283	0,002
Ø 0,7	8,4	0,385	0,003
Ø 0,8	8,4	0,503	0,004
Ø 0,9	8,4	0,636	0,005
Ø 1,0	8,4	0,785	0,007
Ø 1,2	8,4	1,13	0,009
Ø 1,4	8,4	1,54	0,013
Ø 1,5	8,4	1,77	0,015
Ø 1,6	8,4	2,01	0,017
Ø 1,8	8,4	2,54	0,021
Ø 2,0	8,4	3,14	0,026
Ø 2,2	8,4	3,8	0,032
Ø 2,5	8,4	4,91	0,041
Ø 2,6	8,4	5,31	0,045
Ø 3,0	8,4	7,07	0,059
Ø 3,2	8,4	8,04	0,068
Ø 3,5	8,4	9,62	0,081
Ø 3,6	8,4	10,2	0,086
Ø 4,0	8,4	12,6	0,106
Ø 4,5	8,4	15,9	0,134
Ø 5,0	8,4	19,6	0,165
Ø 5,5	8,4	23,74	0,199
Ø 5,6	8,4	24,6	0,207
Ø 6,0	8,4	28,26	0,237
Ø 6,3	8,4	31,2	0,262
Ø 7,0	8,4	38,5	0,323
Ø 8,0	8,4	50,24	0,422
Ø 9,0	8,4	63,59	0,534
Ø 10,0	8,4	78,5	0,659
1 x 6	8,4	6	0,050

1 x 10	8,4	10	0,084
0,5 x 10	8,4	5	0,042
1 x 15	8,4	15	0,126
1,2 x 20	8,4	24	0,202
1,5 x 15	8,4	22,5	0,189
1,5 x 25	8,4	37,5	0,315
2 x 15	8,4	30	0,252
2 x 20	8,4	40	0,336
2 x 25	8,4	50	0,420
2 x 32	8,4	64	0,538
2 x 35	8,4	70	0,588
2 x 40	8,4	80	0,672
2,1 x 36	8,4	75,6	0,635
2,2 x 25	8,4	55	0,462
2,2 x 30	8,4	66	0,554
2,5 x 40	8,4	100	0,840
3 x 25	8,4	75	0,630
3 x 30	8,4	90	0,756
1,8 x 25	8,4	45	0,376
3,2 x 32	8,4	102,4	0,860

Нихромовые нагреватели (NiCr)

"Нихромы" (сплавы Ni-Cr и Ni-Cr-Fe) применяются как в промышленности, так и в бытовых приборах.

"Нихромы" характеризуются: отличными механическими свойствами в "холодном" и "горячем" состоянии, а также после длительной эксплуатации, поэтому не требуют намотки на керамическую трубку; высокой однородностью структуры сплавов. Максимальная температура эксплуатации нихромов (в частности наилучшего сплава Х20Н80) – 1200 °С.

Предостережение, если вы используете нихромовые нагреватели:

- в серосодержащих атмосферах при температурах выше 650 °С проявляется, так называемый, эффект "зеленой гнили", приводящий к интенсивному разрушению сплавов этого класса;
- в атмосфере, содержащей углерод, в температурном интервале 600-900 °С происходит интенсивное разрушение сплавов этого класса. В процессе эксплуатации **нихромовых нагревателей** поверхностная защитная пленка отслаивается, образуя окалину, что приводит к загрязнению нагреваемых поверхностей и термообрабатываемых деталей.

Нихром сохраняет пластичность после остывания: спираль можно снять, поправить форму, согнуть по другому, т.е его целесообразно применять в тех случаях, когда намотка на керамическую трубку

по каким-либо причинам невозможна, например, при укладке намотанной спирали в узкие пазы из керамики.

Никельхромовые сплавы могут работать в контакте с шамотом любой марки, не взаимодействуя с ним.

Форма поставки:

- в виде проволоки;
- в виде ленты;
- в бухтах.

Расчет спирали из нихрома

Те, кому очень часто приходится иметь с заменой нагревательных элементов из нихрома и самодельным изготовлением спиралей обратят внимание на несколько унифицированный подход к самой проблеме намотки спирали, когда известен диаметр стержня для намотки и диаметр нихромового провода. Для расчета спиралей из нихрома под 220V исходим из расчета, что удельное сопротивление из нихрома равно - 1,1 x Ом x мм²/м. Исходя из этого можно довольно быстро определить длину намотки виток к витку в зависимости от толщины провода и диаметра применяемого для намотки стержня на котором, вы собираетесь наматывать вашу спираль. Приводится таблица с уже готовыми длинами намотки спирали и диаметрами применяемых стержней для намотки спирали виток к витку.

Таблица 1.

0,2м м	0,2м м	0,3м м	0,3м м	0,4м м	0,4м м	0,5м м	0,5м м	0,6м м	0,6м м	0,7м м	0,7м м	0,8м м	0,8м м	0,9м м	0,9м м	1,0м м	1,0м м
Диам Стер жня в мм	Длин а Спир али в см.	Диам Стер жня в мм.	Длин а Спир али в см.	Диам Стер жня в мм.	Длин а Спир али в см.	Диам Стер жня в мм.	Длин а Спир али в см.	Диам Стер жня в мм.	Длин а Спир али в см.	Диам Стер жня в мм.	Длин а Спир али в см.	Диам Стер жня в мм.	Длин а Спир али в см	Диам Стер жня в мм	Длин а Спир али в см	Диам Стер жня в мм	Длин а Спир али в см
1,5	49	1,5	59	1,5	77	2	64	3	76	2	84	3	68	3	78	3	75
2	30	2	43	2	68	3	46	3	53	3	62	4	54	4	72	4	63
3	21	3	30	3	40	4	36	4	40	4	49	5	46	6	68	5	54
4	16	4	22	4	28	5	30	5	33	5	40	6	40	8	52	6	48
5	13	5	18	5	24	6	26	6	30	6	34	8	31			8	33
				6	20			8	22	8	26	10	24			10	30
										10	22						

Вам всего лишь потребуется не большая корректировка в зависимости от того, что вы имеете у себя в наличии.

Если вы хотите рассчитать спираль на другое напряжение то это довольно сделать не трудно, например вам необходимо определить длину спирали на напряжение 127V из нихрома диаметром

0,3мм при этом у вас стержень для намотки спирали диаметром 4мм. Из таблицы видно, что длина спирали на напряжение 220V равна 22см из этого и составляем пропорцию, где $220V = 22\text{см}$, а $127V = X\text{ см}$. То тогда отсюда $127V \times 22 / 220V = 12.7\text{ см}$. Если вы хотите применять спирали в закрытом виде, то длину намотки спирали от получаемой в таблице необходимо увеличить на 1/3 значения это вас сэкономит от быстрого перегрева и выхода из строя спирали.

Нагреватели из фехрали (FeCrAl)



"Фехраль" (сплав Fe-Cr-Al) – более прогрессивный нежели нихром материал, широко используется в электропечах сопротивления, для всех отраслей промышленности (машиностроение, литейные и термические цеха, производство керамики и стекла, сушильные цеха). **Нагреватели из фехрали** применяются в электропечах до температур 1400°C. Являются аналогом материала А-1 фирмы KANTHAL.

Преимущества фехралевых нагревателей по сравнению с нихромом:

- цена – меньше в три раза, что приводит в конечном итоге к снижению стоимости печи;
- более длительный срок службы при одинаковой с нихромом температуре эксплуатации (в зависимости от условий эксплуатации от двух до четырех раз);
- отсутствие окалина, вследствие чего спирали не требуется закрывать;
- больший срок службы в восстановительных атмосферах;
- более высокая удельная поверхностная мощность;
- меньшая плотность.

Совокупное действие всех вышеперечисленных факторов приводит к существенному снижению массы нагревателя и, в конечном итоге, к снижению его стоимости. Пластичность фехрали растет с ростом температуры, при температуре 800-1000 °С сплавы легко поддаются деформации под собственным весом, поэтому нагревательные элементы требуется устанавливать на керамических трубках. При нагреве до температуры 900-950 °С и выше наступает быстрый рост зерна, приводящий к необратимому охрупчиванию металла, поэтому ремонт спиралей производится с большой осторожностью, неснимая спираль с печи.

При температуре выше 1000 °С фехраль может работать в контакте лишь с высокоглинозёмистыми огнеупорными материалами (с содержанием оксида алюминия не менее 50%). Работоспособность фехрали обеспечивается образующейся на ее поверхности защитной пленкой из Al_2O_3 , поэтому при работе в безокислительных средах данную защитную пленку необходимо периодически возобновлять, производя отжиг в окислительной среде (на воздухе).