



Нагреватели

Методика и примеры расчета

Нагреватели. Методика и примеры расчета

Автор:
Никонов Николай Владимирович

Статья “Нагреватели. Методика и примеры расчета” содержит обзор по расчету нагревателей электрических печей. Рассматриваются материалы, используемые для изготовления нагревателей, их свойства, достоинства и недостатки, условия работы (нихром, вольфрам, молибден и др.), описана цель расчета нагревателей, приведены методики, описанные на конкретных примерах. Также статья содержит справочные таблицы и ссылки на ГОСТы, необходимые для проведения расчета нагревателей электрических печей.

	Введение	→	4
Глава 1	Нагреватели. Материалы для изготовления нагревателей	→	5
1.1	Требования к нагревателям	→	5
1.2	Материалы для изготовления нагревателей	→	7
Глава 2	Расчет нагревателей электрических печей	→	10
2.1	Определение диаметра и длины нагревателя (нихромовой проволоки) для заданной мощности печи (простой расчет)	→	10
2.2	Определение диаметра и длины нагревателя (нихромовой проволоки) для заданной печи (подробный расчет)	→	15
	Заключение	→	29
	Список литературы	→	29



Очень часто при желании сделать или отремонтировать нагреватель электропечи своими руками у человека появляется много вопросов. Например, какого диаметра взять проволоку, какова должна быть ее длина или какую мощность можно получить, используя проволоку или ленту с заданными параметрами и т.д. При правильном подходе к решению данного вопроса необходимо учитывать достаточно много параметров, например, силу тока, проходящего через нагреватель, рабочую температуру, тип электрической сети и другие.

В данной статье приводятся справочные данные о материалах, наиболее распространенных при изготовлении нагревателей электрических печей, а также методика и примеры их расчета (расчета нагревателей электрических печей).

1.1. Требования к нагревателям

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.

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](http://www.metotech.ru/garsplavy-price.htm)” - <http://www.metotech.ru/garsplavy-price.htm>).

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 X20H80](#), [X15H60](#), железохромоалюминиевый сплав [фехраль X23Ю5Т](#), 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.

1.2. 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" и в [ГОСТ 12766.1-90](#) "Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия".

Представителями хромоникелевых сплавов является нихром марок Х20Н80, Х20Н80-Н (950-1200°C), Х15Н60, Х15Н60-Н (900-1125°C), железохромоалюминиевых – фехраль марок Х23Ю5Т (950-1400 °C), Х27Ю5Т (950-1350°C), Х23Ю5 (950-1200°C), Х15Ю5 (750-1000 °C).

Также существуют железо-хромоникелевые 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.

[НИХРОМ]

Достоинства нихрома:

- + хорошие механические свойства как при низких, так и при высоких температурах;
- + сплав крипоустойчив¹;
- + имеет хорошие технологические свойства – пластичность и свариваемость;
- + хорошо обрабатывается;
- + не стареет, немагнитен.

Недостатки нихрома:

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

¹ Крипоустойчивость

материала характеризуется его пределом ползучести, представляющим, собой напряжение, соответствующее при данной температуре определенному удлинению материала в условленное заданное время.



[ФЕХРАЛЬ]

Достоинства фехрали:

- + более дешевый сплав по сравнению с нихромом, т.к. не содержит никель;
- + 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:

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

Также сравнение сплавов фехраль и нихром производится на странице "[Х20Н80 - описание](http://www.metotech.ru/x20n80-opisanie.htm)" (<http://www.metotech.ru/x20n80-opisanie.htm>).

В последнее время разработаны сплавы типа Х15Н6Ю3 и Х27Н7Ю3, т.е. с добавлением 3% алюминия, что значительно улучшило жаростойкость сплавов, а наличие никеля практически исключило имеющиеся у железохромоалюминиевых сплавов недостатки. Сплавы Х15Н6Ю3, Х27Н6Ю3 не взаимодействуют с шамотом и окислами железа, достаточно хорошо обрабатываются, механически прочны, нехрупки. Максимальная рабочая температура сплава Х15Н6Ю3 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 в защитной среде до 3000 °С. В особых случаях применяют нагреватели из тантала и ниобия.



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

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, которое рассмотрено в [гл. 2.2](#). 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 Х20Н80, который является одним из самых популярных при изготовлении нагревательных элементов.

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 Х20Н80.

Расчет:

1. Сначала необходимо определить силу тока, которая будет проходить через нагревательный элемент (расчетная сила тока):

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

I - сила тока, проходящего через нагреватель [А],

P - мощность нагревателя [Вт],

U - напряжение на концах нагревателя [В].

2. Теперь нужно найти сопротивление нагревателя:

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

R - сопротивление нагревателя [Ом],
 U - напряжение на концах нагревателя [В],

I - сила тока, проходящего через нагреватель [А].

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 и температуре нагревателя 800 °С использовать нихромовую проволоку диаметром 0,4 мм, то она сгорит. Поэтому, рассчитав силу тока, необходимо выбрать из [таблицы 1](#) соответствующее значение диаметра проволоки. Для силы тока 6 А выбираем диаметр проволоки 0,55 мм. 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 проволоки, мм	Площадь поперечного сечения проволоки, мм ²	Температура нагревателя, °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	60	80	93	110	129	151
3	7,07	22,3	37,5	54,5	64	77	88	102
2,5	4,91	16,6	27,5	40	46,6	57,5	66,5	73
2	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51
1,8	2,54	10	16,9	24,9	29	33,1	39	43,2
1,6	2,01	8,6	14,4	21	24,5	28	32,9	36
1,5	1,77	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30	33
1,4	1,54	7,25	12	17,4	20	23,30	27	30
1,3	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21	24,4	27
1,2	1,13	6	9,8	14	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

Диаметр проволоки, мм	Площадь поперечного сечения проволоки, мм ²	Температура нагревателя, °С						
		200	400	600	700	800	900	1000
		Максимальная допустимая сила тока, А						
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	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	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

Примечания:

1. если нагреватели находятся внутри нагреваемой жидкости, то нагрузку (допустимую силу тока) 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).



ТАБЛИЦА 2

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

Марка сплава	Диаметр, мм	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{ном}$, мкОм·м
X20H80-H	0,1 - 0,5	1,08
	0,5 - 3,0	1,11
	> 3,0	1,13
X15H60, X15H60-H	0,1 - 3,0	1,11
	> 3,0	1,12
X23Ю5Т	Все диаметры	1,39

4. Далее определим длину нихромовой проволоки.

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

R - электрическое сопротивление проводника (нагревателя) [Ом],
 ρ - удельное электрическое сопротивление материала нагревателя [Ом · мм² / м],
l - длина проводника (нагревателя) [м],
S - площадь поперечного сечения проводника (нагревателя) [мм²].
 Таким образом, получим длину нагревателя:

$$l = R \cdot S / \rho = 61 \cdot 0,096 / 1,11 = 5,3 \text{ м.}$$

В данном примере в качестве нагревателя используется нихромовая проволока \varnothing 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 X20H80 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.

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

Расчет, приведенный в данном параграфе, является более сложным, чем представленный в 2.1. 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 может 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

$$I = P / U,$$

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**:
I. к бытовой сети однофазного тока - тогда **U** = 220 В;
II. к промышленной сети трехфазного тока - **U** = 220 В (между нулевым проводом и фазой) или **U** = 380 В (между двумя любыми фазами).

Далее расчет будет проведен отдельно для однофазного и трехфазного подключения.



[Бытовая сеть однофазного тока]

$$I = P / U = 6000 / 220 = 27,3 \text{ A}$$

- ток, проходящий через нагреватель. Затем необходимо определить сопротивление нагревателя печи.

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

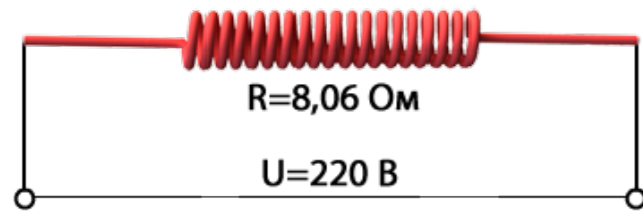


Рисунок 1. Проволочный нагреватель в сети однофазного тока

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 $6 / 3 = 2$ кВт на фазу. Таким образом, нам требуется 3 нагревателя. Далее необходимо выбрать способ подключения непосредственно нагревателей (нагрузки).

Способов может быть два: **“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 -

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

Сопротивление одного нагревателя -

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

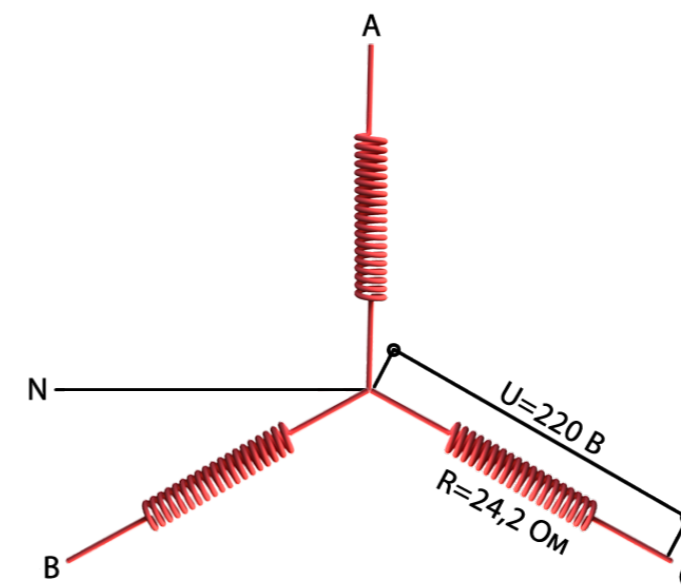


Рисунок 2. Подключение нагревателей по схеме “звезда”

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 -

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

Сопротивление одного нагревателя -

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

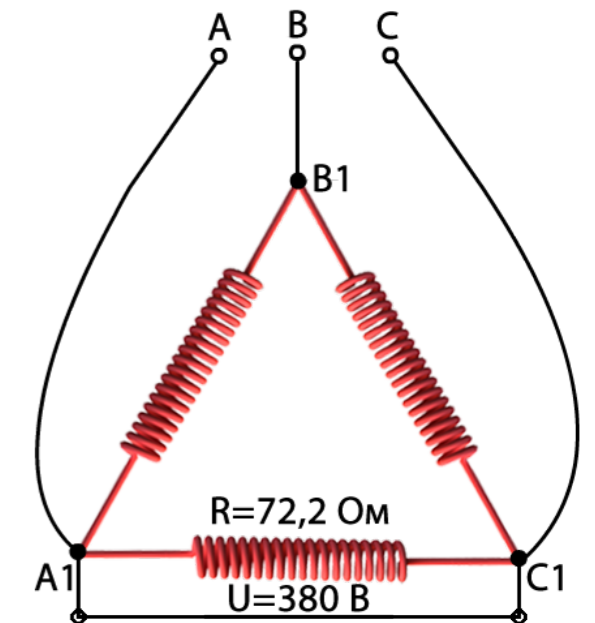


Рисунок 3. Подключение нагревателей по схеме “треугольник”

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

Приведем 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 нихромовую проволоку Х20Н80 диаметром 1 мм. Тогда, чтобы получить требуемое сопротивление, необходимо $I = R / \rho = 8,06 / 1,4 = 5,7$ 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

$$m = I \cdot \mu = 5,7 \cdot 0,007 = 0,0399 \text{ кг} = 40 \text{ г},$$

μ - масса 1 м проволоки.

Теперь необходимо определить площадь поверхности отрезка проволоки длиной 5,7 м.

$$S = I \cdot \pi \cdot d = 570 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 179 \text{ см}^2,$$

I – длина проволоки [см],

d – диаметр проволоки [см].

Таким образом, с площади 179 см² должно выделяться 6 кВт (см. 2.2 п. 2). Решая простую пропорцию, получаем, что с 1 см² выделяется мощность 33,5 Вт.

$$\beta = P / S = 6000 / 179 = 33,5 \text{ Вт/см}^2,$$

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. Стоит отметить, что обычно при расчетах нагревателей рассматривают температуру печи ($T_{\text{печи}}$). $T_{\text{печи}}$ – условная температура, средняя между температурами стен и нагревателей.

Она ограничивается допустимой рабочей температурой нагревателей и должна быть по крайней мере на 50 °С меньше последней. С другой стороны, $T_{\text{печи}}$ не должна сильно превышать заданную температуру нагрева изделия, т.к. это может привести к его перегреву в случае несвоевременного отключения печи.

Для **высокотемпературных печей** (при температуре более 700 – 800 °С) допустимая поверхностная мощность, Вт/м², равна

$$\beta_{\text{доп}} = \beta_{\text{эф}} \cdot \alpha,$$

$\beta_{\text{эф}}$ – поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды [Вт/м²],
 α – коэффициент эффективности излучения.

($\beta_{\text{эф}}$ выбирается по табл. 3, α - по табл. 4.)

Если **печь низкотемпературная** (температура менее 200 – 300 °С), то допустимую поверхностную мощность можно считать равной

$$(4 - 6) \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$



ТАБЛИЦА 3

Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры теплопринимающей среды

Температура теплопринимающей поверхности, °С	$\beta_{эф}$ · Вт/см ² при температуре нагревателя, °С				
	800	850	900	950	1000
100	6,1	7,3	8,7	10,3	12,5
200	5,9	7,15	8,55	10,15	12,0
300	5,65	6,85	8,3	9,9	11,7
400	5,2	6,45	7,85	9,45	11,25
500	4,5	5,7	7,15	8,8	10,55
600	3,5	4,7	6,1	7,7	9,5
700	2	3,2	4,6	6,25	8,05
800	-	1,25	2,65	4,2	6,05
850	-	-	1,4	3,0	4,8
900	-	-	-	1,55	3,4
950	-	-	-	-	1,8
1000	-	-	-	-	-
1050	-	-	-	-	-
1100	-	-	-	-	-
1150	-	-	-	-	-
1200	-	-	-	-	-
1300	-	-	-	-	-

$\beta_{эф}$ · Вт/см ² при температуре нагревателя, °С						
1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
14,15	16,4	19,0	21,8	24,9	28,4	36,3
14,0	16,25	18,85	21,65	24,75	28,2	36,1
13,75	16,0	18,6	21,35	24,5	27,9	35,8
13,3	15,55	18,1	20,9	24,0	27,45	35,4
12,6	14,85	17,4	20,2	23,3	26,8	34,6
11,5	13,8	16,4	19,3	22,3	25,7	33,7
10,0	12,4	14,9	17,7	20,8	24,3	32,2
8,1	10,4	12,9	15,7	18,8	22,3	30,2
6,85	9,1	11,7	14,5	17,6	21,0	29,0
5,45	7,5	10,3	13	16,2	19,6	27,6
3,85	6,15	8,65	11,5	14,5	18,1	26,0
2,05	4,3	6,85	9,7	12,75	16,25	24,2
-	2,3	4,8	7,65	10,75	14,25	22,2
-	-	2,55	5,35	8,5	12,0	19,8
-	-	-	2,85	5,95	9,4	17,55
-	-	-	-	3,15	6,55	14,55
-	-	-	-	-	-	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 нам требуется нагреть заготовку до температуры 700 °С. Тогда по **таблице 3** подбираем $\beta_{эф} = 8,05 \text{ Вт/см}^2$, по **таблице 4** - $\alpha = 0,2$. Далее рассчитаем допустимую поверхностную мощность нагревателя

$$\beta_{доп} = \beta_{эф} \cdot \alpha = 8,05 \cdot 0,2 = 1,61 \text{ Вт/см}^2 = 1,61 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

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:

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

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

$$\rho_t = \rho_{20} \cdot k,$$

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:

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

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 $P = 6000$ Вт (см. 2.2 п. 2), напряжение на концах нагревателя - $U = 220$ В (см. 2.2 п. 3), допустимая поверхностная мощность нагревателя $\beta_{\text{доп}} = 1,6 \cdot 10^4$ Вт/м² (см. 2.2 п. 4). Тогда получаем:

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

$$= \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 6000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx$$

$$\approx 0,00279 \text{ м} \approx 2,79 \text{ мм}$$

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 $\varnothing 2,8$ мм. Диаметр нагревателя $d = 2,8$ мм.

Теперь рассчитаем длину нагревателя.

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

$$= \sqrt[3]{\frac{6000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx$$

$$\approx 42,81 \approx 43 \text{ м}$$

Длина нагревателя $l = 43$ м.

Также иногда требуется определить массу необходимого количества проволоки.

$$m = l \cdot \mu,$$

m - масса отрезка проволоки, [кг];

l - длина проволоки, [м];

μ - удельная масса (масса 1 метра проволоки), [кг/м].

В нашем случае масса нагревателя

$$m = l \cdot \mu = 43 \cdot 0,052 \approx 2,3 \text{ кг.}$$

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 нужная нам длина составит

$$l = R / (\rho \cdot k) =$$

$$= 8,06 / (0,179 \cdot 1,025) \approx 43 \text{ м,}$$

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 2.2 п. 4.

$$\beta = P / S = 6000 / (3,14 \cdot 4300 \cdot 0,28) \approx$$

$$\approx 1,59 \text{ Вт/см}^2.$$

Полученное значение $\beta \approx 1,59$ Вт/см² не превышает $\beta_{\text{доп}} = 1,6$ Вт/см².

Итоги

Таким образом, для нагревателя потребуется 43 метра нихромовой проволоки Х20Н80 $\varnothing 2,8$ 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 [2.2 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](#))

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

$$= \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx$$

$$\approx 0,00134\text{м} \approx 1,34\text{мм}$$

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

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

$$= \sqrt[3]{\frac{2000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx$$

$$\approx 29,69\text{м} \approx 30\text{м}$$

Длина одного нагревателя $l = 30$ м.
Масса одного нагревателя

$$m = l \cdot \mu = 30 \cdot 0,013 = 0,39 \text{ кг.}$$

Проверка

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

$$l = R / (\rho \cdot k) =$$

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

Значение длины, полученное в результате проверки, практически совпадает со значением длины, полученным в результате расчета нагревателей.

Поверхностная мощность составит

$$\beta = P / S = 2000 / (3,14 \cdot 3000 \cdot 0,14) =$$

$$= 1,52 \text{ Вт/см}^2,$$

она не превышает допустимую.

Итоги

Для трех нагревателей, подключенных по схеме "ЗВЕЗДА", потребуется

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

что составляет

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

Подключение типа "ТРЕУГОЛЬНИК"
(см. [рис. 3](#))

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

$$= \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 380^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx$$

$$\approx 0,00093\text{м} \approx 0,93\text{мм}$$

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

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

$$= \sqrt[3]{\frac{2000 \cdot 380^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx$$

$$\approx 42,74\text{м} \approx 43\text{м}$$

Длина одного нагревателя $l = 43$ м.
Масса одного нагревателя

$$m = l \cdot \mu = 43 \cdot 0,006 = 0,258 \text{ кг.}$$

Проверка

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

$$l = R / (\rho \cdot k) =$$

$$= 72,2 / (1,55 \cdot 1,025) \approx 45 \text{ м.}$$

Значение длины, полученное в результате проверки, практически совпадает со значением длины, полученным в результате расчета нагревателей.

Поверхностная мощность составит

$$\beta = P / S = 2000 / (3,14 \cdot 4300 \cdot 0,095) =$$

$$= 1,56 \text{ Вт/см}^2,$$

она не превышает допустимую.

Итоги

Для трех нагревателей, подключенных по схеме "ТРЕУГОЛЬНИК", потребуется

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

что составляет

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



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,

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.

В статье были рассмотрены различные аспекты, касающиеся расчета нагревателей электрических печей - материалы, примеры расчета с необходимыми справочными данными, ссылками на стандарты, иллюстрациями.

В примерах были рассмотрены методики расчета только проволочных нагревателей. Помимо проволоки из прецизионных сплавов для изготовления нагревателей может применяться и лента.

Расчет нагревателей не ограничивается выбором их размеров. Также необходимо определить материал, из которого должен быть сделан нагреватель, тип нагревателя (проволочный или ленточный), тип расположения нагревателей и другие особенности. Если нагреватель изготавливается в виде спирали, то необходимо определить количество витков и шаг между ними.

Надеемся, что статья оказалась Вам полезной. Мы допускаем её свободное распространение при условии сохранения ссылки на наш сайт:

<http://www.metotech.ru>

В случае обнаружения неточностей - просим сообщить нам о них на адрес электронной почты:

metotech@mail.ru

1. Блажкин А.Т., Бессекерский В.А., Фролов Б.В. и др.
Под ред. А.Т. Блажкина.
"Общая электротехника".
2. Дьяков В.И.
"Типовые расчеты по электрооборудованию".
3. Жуков Л.Л., Племянникова И.М., Миронова М.Н., Баркая Д.С., Шумков Ю.В.
"Сплавы для нагревателей".
4. Свенчанский А.Д.
"Электрические промышленные печи. Часть первая. Электрические печи сопротивления"
5. Сокунов Б.А., Грובהва Л.С.
"Электротермические установки (электрические печи сопротивления)".
6. Фельдман И.А., Гутман М.Б., Рубин Г.К., Шадрич Н.И.
"Расчет и конструирование нагревателей электропечей сопротивления".
7. <http://www.horss.ru/index.php/goods/osnovnye-svedeniya/76-pechi/677-raschetnagrevatelei>
8. <http://www.electromonter.info/advice/nichrom.html>

