

увеличением крупности зерен брикетированного торфа; процесс сорбции и протекает наиболее интенсивно в течении первых 20-30 минут; степень достижения равновесия для Fe^{+3} составила $F= 0,8$ при продолжительности 60 мин. Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности использования брикетированного торфа в качестве эффективного сорбента для очистки сточных вод от ионов Fe^{+3} .

Список использованных источников:

1. Житенёв, Б.Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Б.Н. Житенёв, Д.Д. Сенчук // Вестник Брестского государственного технического университета, БрГТУ, 2019, № 2 (104) /Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология. – С. 61-65.
2. Житенев, Б.Н. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди / Б.Н. Житенев, А.Д. Гуринович, Д.Д. Сенчук // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. – С. 1534–1545.
3. Строкач, П.П. Практикум по технологии очистки природных вод / П.П.Строкач, Л.А.Кульский – М.: Высш. шк. 1980. – с.98-99.

Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Томашев И.Г.

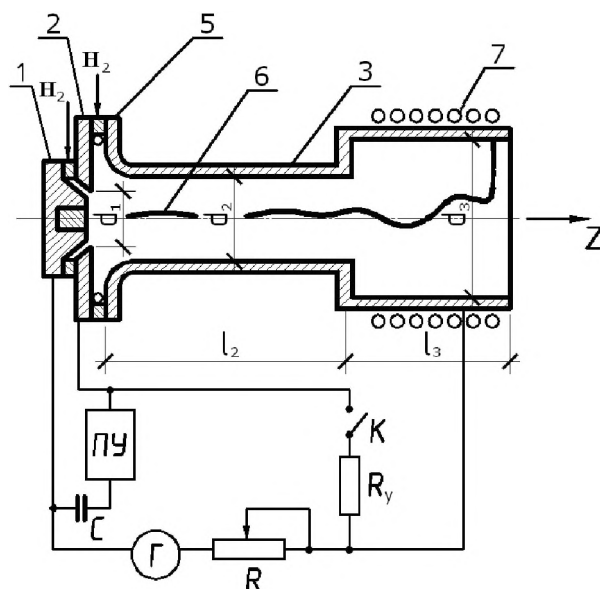
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Брестский государственный технический университет, кафедра прикладной механики

Введение. В настоящее время широко используются экономически эффективные процессы совместного получения ацетилена и этилена из углеводородного сырья, плазмохимической переработки отходов различных производств и т.д. Особенно перспективны процессы с применением водородной низкотемпературной плазмы [1–6]. В процессах, где для подвода энергии используется горение газов, коэффициент полезного использования энергии весьма низок, причем из-за наличия кислорода в рабочей смеси образуется значительное количество смолообразных полимеров. Это снижает выход целевых продуктов и усложняет последующую переработку крекинг-газа. Этих недостатков можно избежать, если для проведения пиролиза углеводородов использовать в качестве теплоносителя водород, нагретый до температуры 3000–4000 К. В качестве генератора водородной плазмы может выступать плазмотрон постоянного или переменного тока требуемой мощности. Увеличение мощности и ресурса работы таких плазмотронов в значительной мере определяется успехами в изучении эрозии электродов в области приэлектродных участков дуги [4–6]. Эрозия катода возникает вследствие сложных тепловых, электрических, химических и механических процессов в приэлектродной области. Основной упор в большинстве исследований по эрозии делается на экспериментальное изучение явлений и эмпирическое обобщение опытных данных для того, чтобы в дальнейшем создать обоснованную математическую модель и найти рациональные методы расчета оптимальных конструкций катодов. Основным фактором, определяющим скорость эрозии, является удельный тепловой поток в катод. Для

термоэмиссионных электродов он, как правило, превышает 50 кВт/см^2 и зависит от рода рабочего газа, силы тока, характера охлаждения электрода и других факторов. Если дуга горит в водороде, то удельный тепловой поток вследствие высокой теплопроводности этого газа особенно велик, поэтому такого рода исследования являются актуальными.

Описание плазмотрона. Схема плазмотрона, его электропитания и поджига приведена на рисунке 1. Основными элементами плазмотрона являются катод 1, поджигающий электрод 2 и ступенчатый анод 3. Катод выполнен из торированного вольфрамового стержня длиной 10 мм, впаянного заподлицо в медную обойму. В экспериментах использовались вольфрамовые стержни диаметром 3–10 мм. Поджигающий электрод выполнен из меди в виде секции-шайбы с внутренним диаметром $d_1 = 16 \text{ мм}$. Испытанные медные ступенчатые аноды имели диаметры $d_2 = 8 \text{ мм}$ и $d_3 = 16 \text{ мм}$, длину $l_2 = 30\text{--}50 \text{ мм}$. Длина анода $l = l_2 + l_3$ изменялась от 90 до 150 мм. Для уменьшения эрозии рабочей поверхности анода установлен навитый из медной трубки соленоид 7. Создаваемое им осевое магнитное поле ($0,06\text{--}0,08 \text{ Тл}$), обеспечивает такие скорости вращения замыкающего радиального участка дуги, при которых ресурс работы анода достигает свыше 1000 часов. Катод, поджигающий электрод, анод и соленоид интенсивно охлаждаются химически очищенной водой. Вода подается в систему охлаждения плазмотрона под давлением 10–15 атм. Для расчета тепловых потоков в электроды определяли температуру воды на входе и выходе из плазмотрона при помощи хромель-копелевых термопар с записью показаний прибором ЭМП–109 АИ.



1 – катод, 2 – поджигающий электрод, 3 – анод,
4 и 5 – изоляторы, 6 – дуга, 7 – соленоид

Рисунок 1 – Схема плазмотрона и электропитания

Давление водорода перед расходомерами на входе плазмотрона составляло $(4\text{--}8) \cdot 10^5 \text{ Па}$. Расход газа измерялся приборами типа ПВ–1033, а его плавная регулировка осуществлялась автоматическими приборами типа ДМПК–100. В зазор между катодом и поджигающим электродом через 2 тангенциальных отверстия диаметром 1,2 мм, расположенных в кольце закрутки с внутренним диаметром 50 мм, подавался водород (расход 0,1–0,2 г/с). Во вторую камеру закрутки 5, расположенную между поджигающим электродом и анодом, газ поступал через 4 тангенциальных

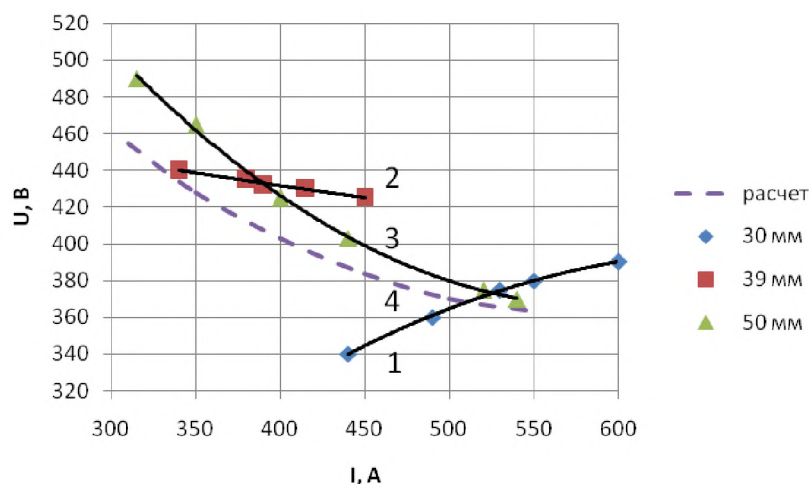
отверстия диаметром 2,4 мм, расположенных в кольце закрутки с внутренним диаметром 64 мм. Суммарный расход водорода варьировался от 0,9 до 1,2 г/с.

Электропитание плазмотрона осуществлялось от источника питания с номинальным током 600 А и напряжением 900 В. Т.к. его внешняя электрическая характеристика жесткая, а ВАХ дуги падающая из-за неустойчивого горения дуги, в силовую цепь последовательно с дугой с целью обеспечения устойчивого ее горения включено изменяющееся ступенчато балластное сопротивление R . Поджиг плазмотрона осуществлялся при помощи высоковольтного высокочастотного осциллятора с подачей напряжения на поджигающий электрод 3. Между поджигающим электродом и анодом через контактор включено сопротивление $R_{\gamma}=10-20$ Ом. Такая схема включения осциллятора в электрическую цепь питания плазмотрона позволяла исключить попадание ВЧ-напряжения в силовую цепь питания и обеспечивала тем самым надежную защиту выпрямителя от перенапряжения. Соленоид 7 включен в цепь электропитания последовательно с дугой.

Исследования вольт-амперных и тепловых характеристик плазмотрона.

В соответствии с методикой [1-3], проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей в водороде. Результаты экспериментов по исследованиям вольт-амперных характеристик подтвердили необходимость поддержания тангенциальной скорости закрутки водорода в пределах 600-1000 м/с и плавного (безотрывного) перехода от кольца закрутки к внутреннему диаметру электрода с целью обеспечения газодинамически устойчивого горения дуги. В экспериментах также было установлено, что дуга в плазмотроне рассматриваемой схемы горит с меньшими пульсациями напряжения по сравнению с дугой с самоустанавливающейся длиной, горящей в цилиндрическом канале без уступа.

На рисунке 2 приведены вольт-амперные характеристики водородной дуги, горящей в плазмотроне с различной длиной анода.



$$G_B = 1 \text{ г/с}, d_2 = 8 \text{ мм}, p = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики дуги при различных l_2

Результаты экспериментов показали, что при $l_2 \leq 30$ мм электрическая характеристика является восходящей (кривая 1) и при величине тока менее 530 А лежит ниже характеристики дуги с самоустанавливающейся длиной (кривая 4), рассчитанной по формуле:

$$U = 3190 \cdot \left(\frac{G}{I}\right)^{0,4} \left(\frac{G}{d}\right)^{0,3} (pd)^{0,36}, \quad (1)$$

где d – внутренний диаметр анода постоянного сечения, мм.

Можно предположить, что при больших величинах тока кривая 1 совпадет с кривой 4 в предположении, что механизм формирования вольт-амперной характеристики дуги в водороде для плазмотрона со ступенчатым выходным электродом аналогичен цилиндрическому аноду.

Следует отметить, что в изученном диапазоне токов при $l_2 \leq 30$ мм дуга горит стабильно. Визуальный осмотр внутренней поверхности анода показал, что шунтирование дуги происходит только за уступом на участке электроразрядной камеры диаметром d_3 . При $l_2 = 50$ мм вольт-амперная характеристика дуги (кривая 3) практически совпадает с расчетной кривой 4, а зона шунтирования уже около уступа захватывает некоторую поверхность электрода диаметром $d_2 = 8$ мм; уступ электрода уже за несколько часов работы подвергается заметной эрозии. Следовательно, длина $l_2 = 50$ мм является больше предельной. При увеличении l_2 более 39 мм возрастают амплитуды пульсаций тока и напряжения, а также уменьшается частота пульсаций.

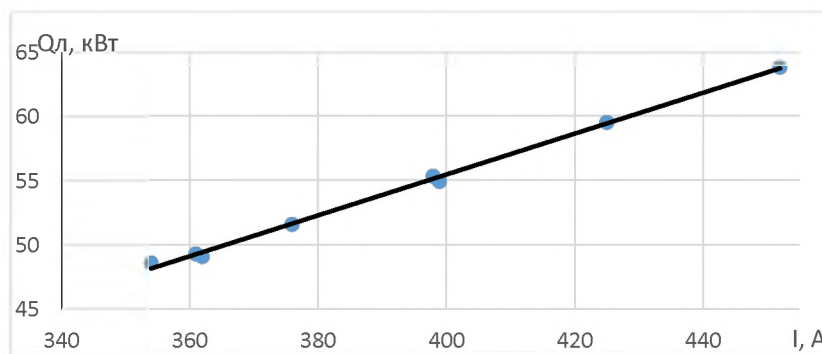
Одновременно с исследованием вольт-амперных характеристик дуги, проводились исследования тепловых потоков в элементы плазмотрона: катод, анод и поджигающий электрод. Это позволило вычислить тепловой к.п.д. плазмотрона, энтальпию и среднемассовую температуру газа в зависимости от величины тока дуги, длины анода и содержания метана в водороде при давлении на выходе из плазмотрона, равном $1,5 \cdot 10^5$ Па.

Исследования тепловых потоков в катод показали, что при использовании в качестве рабочего газа водорода при равных величинах тока и стабильных режимах горения дуги ($l_2 = 39$ мм) они оказались ниже, чем у азота [7]. Несколько неожиданные результаты получаются при нестабильном режиме ($l_2 = 50$ мм), когда возрастает амплитуда тока и снижается частота шунтирования дуги. В этом случае тепловые потоки в катод в рассматриваемом диапазоне величин тока увеличиваются примерно в 2 раза (рисунок 2). Это отражается на скорости эрозии как катода, так и анода. Быстрое разрушение катода в водородной среде было обнаружено при эксплуатации плазмотрона в режиме несамостоятельного горения, когда пульсации тока достигали заметной величины, хотя абсолютная величина тока не превышала нескольких десятков ампер. При больших величинах тока (до 1000 А), но малых (менее 10 %) высокочастотных пульсациях (несколько кГц) степень разрушения была на несколько порядков меньше. Аналогичная картина наблюдается при неустойчивом режиме горения дуги, вызванном шунтированием на уступе. В этом случае каждое пятно привязки хаотически движется по поверхности вольфрама, переходя с нагретых участков поверхности на более холодные. Это приводит к снижению термоэмиссии и увеличению автоэмиссии электронов и, следовательно, к возрастанию тепловых потоков в катод.

Установлено, что в водороде тепловые потери в катод практически не зависят от диаметра вольфрамового стержня, запаянного заподлицо в медную обойму, который в экспериментах изменялся от 3 до 10 мм.

На рисунке 3 приведены тепловые потоки в анод в зависимости от тока дуги для плазмотрона с $d_2 = 8$ мм, $d_3 = 16$ мм, $l_2 = 50$ мм и $l = 100$ мм при расходе водорода 1,1 г/с в рабочем диапазоне токов они достигают 48–64 кВт. По проведенным оценкам

тепловые потери на участке до уступа не превышают 10 кВт, поэтому основные потери тепла приходятся на зону за уступом. С ростом l тепловые потери быстро увеличиваются. Они преимущественно определяются конвективным теплообменом между нагретым потоком водорода и стенкой анода. Поэтому тепловой КПД плазмотрона определяется в основном потерями тепла за уступом. Поэтому для достижения максимального его значения длина l должна быть не более, чем это необходимо для зоны шунтирования дуги.



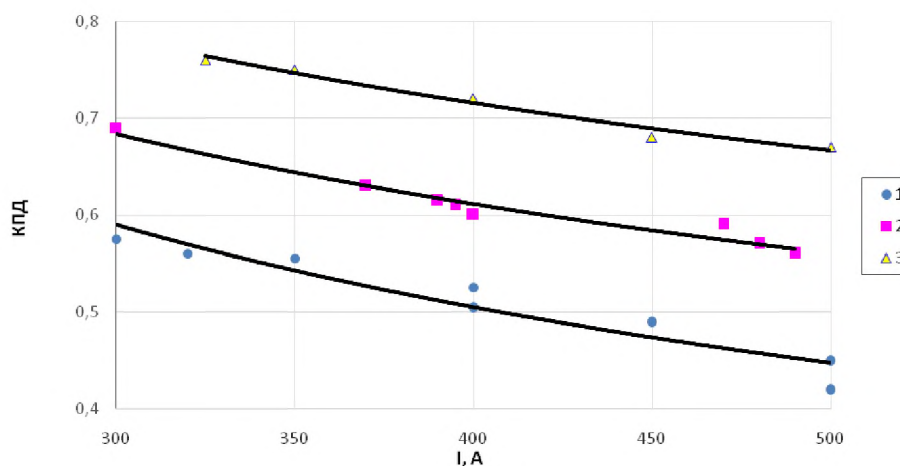
$$G_B = 1,1 \text{ г/с}, d_2 = 8 \text{ мм}, d_3 = 16 \text{ мм}, l_2 = 50 \text{ мм}, l = 100 \text{ мм}$$

Рисунок 3 – Зависимость теплового потока в анод от тока дуги в водороде

Зависимость теплового КПД плазмотрона от величины тока дуги при $G_B = 1 \text{ г/с}$, $l_2 = 50 \text{ мм}$ и различных l приведена на рисунке 4. При длине анода, близкой к оптимальной (90 мм), температура струи достигает 3400 К, а тепловой КПД равен 0,6–0,8. Зависимость теплового КПД от тока можно представить в виде:

$$\frac{1-\eta}{\eta} = 9,45 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I}{G} \right)^{0,4} \bar{l}^{1,38} (pd)^{0,98} \quad (2)$$

где $\bar{l} = \frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3}$, $d_2 = 8 \text{ мм}$, $d_3 = 16 \text{ мм}$, $G_B = 1 \text{ г/с}$, $l = 90, 116, 150 \text{ мм}$.



$$1 - l = 150 \text{ мм}, 2 - l = 116 \text{ мм}, 3 - l = 90 \text{ мм}$$

Рисунок 4 – Зависимость теплового КПД плазмотрона от величины тока дуги

Эрозия электродов. Проведено исследование эрозии электродов. Зависимость удельной эрозии катода от диаметра стержня приведена на рисунке 5. Наименьшее значение удельной эрозии наблюдается для диаметра стержня $d_c \approx 5 \text{ мм}$ и составляет

не более $(2...4) \cdot 10^{-9} \frac{e}{A \cdot c}$. Величина эрозии определялась путем взвешивания катодов до и после эксперимента. Осмотр поверхности катода после длительной работы показал, что величина его удельной эрозии при диаметрах стержня менее 5 мм возрастает из-за того, что пятно дуги начинает захватывать часть медной обоймы, которая интенсивно разрушается. В некоторых экспериментах при $d_c = 5$ мм пятно на вольфрамовой поверхности не всегда стабилизировалось, в этом случае величина эрозии повышалась в несколько раз. Увеличение эрозии при $d_c > 5$ мм связано с ухудшением теплообмена и возрастанием температуры поверхности вольфрама в области прикатодного пятна. При $d_c = 10$ мм пятно дуги перемещалось по площадке диаметром порядка 6 мм, образуя в некоторых местах кратеры диаметром и глубиной до 2 мм после 6–10 часов работы плазмотрона. Оценка ресурса работы катода по полученной удельной эрозии показала, что при величинах тока около 400 А ресурс непрерывной работы катода составит не менее 200 часов.

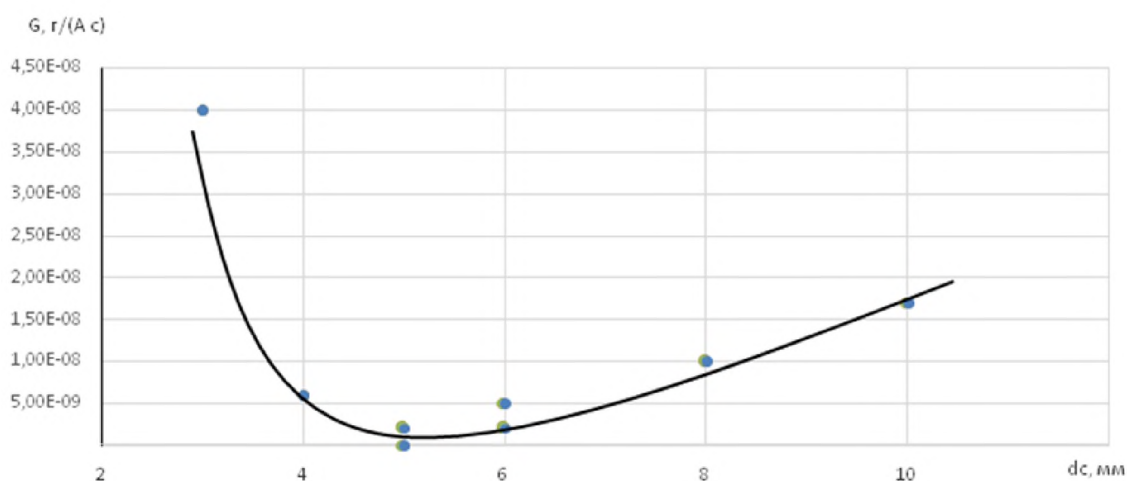


Рисунок 5 – Зависимость удельной эрозии катода от диаметра вольфрамового стержня, при $I = 370 \pm 30$ А

Заключение. Проведены исследования вольт-амперных характеристик, тепловых потоков, эрозии электродов, КПД плазмотрона для генерации низкотемпературной плазмы водорода. На основе созданной методики разработана оригинальная конструкция плазмотрона. Полученные экспериментальные данные и инженерные решения могут служить исходными для проектирования промышленных плазменных установок различной мощности.

Список использованных источников:

1. Веремейчик, А. И. Исследование электрической дуги в потоке гелия в сильноточном плазмотроне / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, Д. Л. Цыганов // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 5. – С. 99–102.
2. Исследование электрической дуги в потоке аргона / В. В. Батрак [и др.] // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 4 : Машиностроение. – С. 26–28.
3. Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Safronov A.A. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. – V. 30, № 4. – P. 1445–1448.
4. Исследование термохимических катодов в дуговых плазмотронах / А. С. Аньшаков [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 4. – С. 685–691.
5. Исследование эрозии электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока / В. Е. Кузнецов [и др.] // Прикладная физика – 2019. – № 3. – С. 24–29.

6. Исследование продуктов эрозии медного электрода плазмотрона переменного тока / Д. И. Субботин [и др.] // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, вып. 11. – С. 1637–1640.
7. Веремейчик, А. И. Исследование эрозии вольфрамового катода плазмотрона для генерации азотной плазмы / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. А. Лазарук // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Брест, 27-31 мая 2019 г. / под ред. чл.-корр. Рубаника В.В. – Витебск, УО «ВГТУ», 2019. – С. 93-95.

Новосельцева Д.В.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТОПЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

*Брестский государственный технический университет, к.т.н., доцент
кафедры теплогазоснабжения и вентиляции*

В 2019 году в г.Барановичи построен первый жилой дом в Брестской области с электроотоплением. На момент постройки — это самый большой из всех «электродомов» в стране. Полная электрическая мощность новостройки — около 625 кВт, что примерно в 3 раза больше обычного дома. Обусловлено это тем, что в соответствии с Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28.11.2017 №899 с 2018 года планируется преимущественное строительство многоквартирных жилых домов с использованием электрической энергии для целей отопления и горячего водоснабжения.

Одним из перспективных вариантов электрического отопления является применение электрических теплых полов. Классификация электрических теплых полов по типу нагревательного элемента: кабельные, нагревательные маты, пленочные, стержневые.

Кабельные полы и маты

Греющий кабель появилась раньше остальных типов. Представляет собой обычный электрический провод, токопроводящая жила которого обладает большим сопротивлением. В результате этого при протекании электрического тока он нагревается. Шаг прокладки кабеля варьируется в пределах 6-12 см. Во время работы теплого пола кабель нагревается максимум до 70-80°C, а материалы изоляции и оболочки выдерживают температуры выше 100°C.

Одножильный имеет только одну греющую жилу, поэтому требует подключения к сети с двух сторон. Это существенный недостаток, т.к. вызывает неудобство при прокладке теплого пола. Одножильный кабель создает интенсивное электромагнитное поле (напряженность магнитного поля 4-8 мкТл, при ПДК в СНГ – 5 мкТл). Двужильный кабель состоит из двух жил (проводов) и не требует подключения в сеть с другого конца. Практически полностью отсутствует электромагнитное поле (0,2-0,25 мкТл, в Европе ПДК 0,2 мкТл на расстоянии 0,5 м от источника), что позволяет использовать его в жилых комнатах.

Мат состоит из пластиковой сетки, к которой прикреплен нагревающий кабель с заданным шагом. В среднем применяется шаг 9 см. Ширина мата обычно составляет 50 см, а длина — в зависимости от модели изделия.