Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Н. Митрошин, Математическая модель для расчета температурных полей
экструдированных изоляционных покрытий кабельных жил, *Вестн. Сам. гос.
техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 27, 88–90

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu279>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и
согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.81.55.215

26 апреля 2023 г., 14:37:16

Математическое моделирование

УДК 678.027.3:677.73

В.Н. Митрошин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КАБЕЛЬНЫХ ЖИЛ

Предлагается новая модель для расчета температурных полей экструдированных изоляционных покрытий кабельных жил при их изготовлении по длине ванн охлаждения. Разработанная модель учитывает преобразование фаз, имеющее место при охлаждении пластмассы, наличие участков воздушного и водяного охлаждения, скорость изолирования, а также температурную зависимость теплофизических параметров полимерного материала изоляции.

При производстве кабелей с пластмассовой изоляцией, накладываемой методом экструзии, протекание процесса охлаждения кабельной изоляции по выходе из экструдера имеет решающее значение для формирования как эксплуатационных параметров качества кабельных изделий, так и для стабильности параметров качества и характеристик кабельной изоляции при ее старении [1-3]. Термические процессы в экструдированной изоляции влияют на молекулярную структуру, механическое напряженное состояние пластмассы, адгезию изоляции и металлического проводника, образование пустот в изоляции и качество ее граничной поверхности. Все эти параметры в свою очередь определяют диэлектрические свойства изоляции [1].

Р и с.1. Схема участка охлаждения экструзионной линии: 1 – головка экструдера, 2 – изолированная жила, 3 – участок воздушного охлаждения, 4 – участок водяного охлаждения, 5 – приемник, V – скорость изолирования – вытяжки, L – общая длина участка охлаждения

Р и с.2. Изолированная кабельная жила: r_0 – радиус внутреннего проводника, R – радиус жилы по изоляции, V – скорость вытяжки, z – продольная координата

внутренние источники тепла отсутствуют.

Зависимость температуры любой точки изоляции кабеля от времени его охлаждения и координаты (текущего радиуса) есть решение уравнения нестационарной теплопроводности [1]:

$$\frac{a_2}{\lambda_2 r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_2 \cdot r \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} - V \frac{\partial T_2}{\partial z} = 0; \quad r_0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq z \leq L. \quad (1)$$

Здесь T – температура; r – текущий радиус; a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; r_0 – радиус внутреннего проводника; R – радиус жилы по изоляции; V – скорость изолирования (вытяжки); L – общая длина участка охлаждения;

температурное поле зависит от свойств материала полимера и проводника (теплопроводности, удельной теплоемкости, плотности), технологических параметров (температуры пластмассы, температуры проводника, скорости изолирования, условий нагрева и охлаждения) и геометрических размеров жилы кабеля (диаметра провода, толщины изоляционного слоя).

На рис. 1 представлена схема участка охлаждения экструзионной линии изолирования, а на рис. 2 – разрез изолированной кабельной жилы.

При расчете температурного поля необходимо учитывать превращение фаз, имеющее место в пластмассе на участке ванн охлаждения. Кроме того, температурное поле в кабеле принимается симметричным относительно его оси. Учитывается также, что

$$z = V\tau, \quad (2)$$

где τ – текущее время; z – продольная координата. Индекс 2 соответствует изоляции, 1 – металлическому проводнику.

С учетом (2) уравнение теплопроводности (1) можно преобразовать к виду:

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} - \frac{a_2}{V^2} \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial \tau^2} = a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \frac{\partial \lambda_2}{\partial r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right]; \quad r_0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k = \frac{L}{V}.$$

На поверхности контакта изоляции и проводника выполняется граничное условие четвертого рода, что соответствует теплообмену тел, находящихся в тепловом контакте (температуры сопрягающихся поверхностей одинаковы) [4]:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, \tau)}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0, \tau)}{\partial r}; \quad T_1(r_0, \tau) = T_2(r_0, \tau).$$

На внешней поверхности изоляции, охлаждаемой теплоносителем (водой – в ванне охлаждения, либо воздухом – на участке воздушного охлаждения), выполняется граничное условие первого рода [4]: $T_2(R, \tau) = T_s(\tau)$, где T_s – температура теплоносителя (воды или воздуха).

Для внутреннего металлического проводника зависимость температуры любой точки $T_1(r, \tau)$ есть решение уравнения нестационарной теплопроводности [4]

$$\frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial r} \right]; \quad 0 \leq r \leq r_0; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k = \frac{L}{V}.$$

Начальные условия для металлического проводника в общем случае имеют вид

$$T_1(r, 0) = f_1(r).$$

Обычно для лучшей адгезии (прилипаемости) расплавленной изоляции к внутреннему проводнику последний предварительно подогревают до температуры порядка 90°C. Справедливо допущение, что $f_1(r) = T_n$; где T_n – температура предварительного подогрева проводника.

Условия в центре жилы могут быть записаны в виде $\frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial r} = 0$; $T_1(0, \tau) \neq \infty$, а началь-

ное условие для изоляции – $T_2(r, 0) = f_2(r)$.

При хорошей кой плотности (ПЭНП). Для ПЭНП при комнатной температуре коэффициент теплопроводности гомогенизации расплава изоляции в зоне дозирования экструдера справедливо допущение, что $f_2(r) = T_p$ где T_p – температура расплава изоляции.

Обычно в качестве изоляции радиочастотных кабелей используется полиэтилен высокого давления низ $\lambda = 0,335$ Дж/м·с·К, а теплоемкость $C = 2,3$ кДж/(кг·К).

Для расчета температурного поля экструдированной изоляции при ее охлаждении необходимо учитывать температурную зависимость теплофизических характеристик пластмассы. В [5] приводятся зависимости коэффициента теплопроводности λ и коэффициента температуропроводности a ПЭНП от температуры полимера (на рис. 3 кривые 1 и 2 соответственно).

Расчет температурного поля осуществляется численными методами, при этом сечение изолированной жилы разбивается на концентрические окружности, расстояние между которыми равно Δr .

Принимается, что в пределах одного слоя изоляции теплофизические характеристики полимерного материала неизменны и равны соответствующим величинам, определяемым значениями температур $\overline{T_{2,i}}$ – средней температуры i -го слоя изоляции.

При расчете температурного поля необходимо учитывать также преобразование фаз, имеющее место в пластмассе при ее охлаждении. Для этого дифференциальное уравнение Фурье должно решаться для двух фаз пластического материала раздельно.

Зависимость удельной теплоемкости ПЭНП от температуры [6] приведена на рис. 4. Полученные математические модели для расчета термических процессов в экструдированных изо-

ляционных покрытиях кабельных жил могут быть использованы для решения следующих задач:

Р и с. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности (1) и коэффициента температуропроводности (2) ПЭНП от температуры.

Р и с.4. Зависимость удельной теплоемкости ПЭНП от температуры.

охлаждения (параметры участков охлаждения);

5) определения максимально возможной скорости охлаждения экструдированной изоляции, не приводящей к возникновению в изоляции чрезмерных внутренних механических напряжений, и, соответственно, к преждевременному старению и разрушению изоляции.

В свете изложенного задача прогнозирования срока службы кабельных изделий, в наибольшей степени определяемого скоростью старения полимерной изоляции, представляется важной самостоятельной задачей, требующей настоящего решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ СПИСОК

1. *Lein P., Muller K., Schulmeister B.* Berechnung von Temperaturfeldern in extrudierten Aderisolierungen // *Elektrokabel*. 1986. № 1. S. 45 – 48.
2. *Al-Karawi J., Schmidt J., Strumke M.* Kopplung von numerischer Berechnung und Experiment zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten bei der Herstellung von Kabeln // *Wiss. Z. Techn. Hochsch. O. Guericke Magdeburg*. 1984. 28. № 4. S. 117 – 119.
3. *Карякин Н.Г., Фурсов П.В.* Расчет возможности образований воздушных включений в пластмассовой изоляции кабеля при охлаждении // *Электротехническая промышленность. Серия: Кабельная техника*, 1977. № 5. С. 8 – 11.
4. *Карташов Э.М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. шк., 2001. 550 с.
5. *Оганесян К.Г.* Расчет времени вулканизации при изолировании жил кабелей вулканизирующим полиэтиленом // *Электротехническая промышленность. Серия: Кабельная техника*, 1975. № 12. С. 7 – 10.
6. *Холодный С.Д., Соколов И.Т., Месенжников Я.З.* Расчет технологических режимов изготовления кабелей с изоляцией из вулканизируемого полиэтилена // *Электротехническая промышленность. Серия: Кабельная техника*, 1979. № 8. С. 7 – 9.

Поступила 12.01.2004 г.