

А.В. Беспрозванных, И.А. Мирчук, А.Г. Кессаев

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

*Обґрунтовано методику розрахунку режиму охолодження силових кабелів в перехідному тепловому режимі. Представлено теплову схему заміщення ізолюваної струмопровідної жили. За допомогою методів дискретних резистивних схем заміщення і вузлових потенціалів отримано розподіл температури в товщі поліетиленової ізоляції в різні моменти часу в залежності від температури води, що охолоджує. Показано, що тривалість перехідного процесу, що відповідає досягненню однакової температури по всій товщині ізоляції, можна розглядати в якості критерію при визначенні технологічних параметрів охолодження. Бібл. 12, рис. 7.*

**Ключові слова:** режим охолодження, поліетиленова ізоляція, теплова схема заміщення, метод дискретних резистивних схем заміщення, несталый режим, метод вузлових потенціалів, система лінійних алгебраїчних рівнянь, довжина ванни охолодження.

*Обоснована методика расчета режима охлаждения силовых кабелей в переходном тепловом режиме. Представлена тепловая схема замещения изолированной токопроводящей жилы. С помощью методов дискретных резистивных схем замещения и узловых потенциалов получено распределение температуры в толще экструдированной полиэтиленовой изоляции в разные моменты времени в зависимости от температуры охлаждающей воды. Показано, что длительность переходного процесса, соответствующая достижению одинаковой температуры по всей толщине изоляции, можно рассматривать в качестве критерия при определении технологических параметров охлаждения. Библ. 12, рис. 7.*

**Ключевые слова:** режим охлаждения, полиэтиленовая изоляция, тепловая схема замещения, метод дискретных резистивных схем замещения, неустойчивый режим, метод узловых потенциалов, система линейных алгебраических уравнений, длина ванны охлаждения.

**Введение.** Режим охлаждения полимерной изоляции после наложения на экструдере является одним из основных факторов, определяющих эксплуатационные характеристики кабеля. Теоретически идеально охлаждение изоляции при температуре охлаждающей среды, равной температуре плавления материала изоляции: в таком случае меньше вероятность образования пустот в изоляции [1-3]. В процессе охлаждения тепло от поверхности изоляции отводится с помощью воздуха или воды более низкой температуры. Процесс охлаждения преимущественно подчиняется закономерностям конвективного теплообмена, причем, обычно наблюдается вынужденная конвекция за счет постоянного осевого перемещения заготовки в ходе технологического процесса. Процесс изменения температуры по толщине изоляции или оболочки, то есть внутри твердого тела, происходит по законам теплопроводности.

К процессу охлаждения обычно не предъявляются жесткие требования, так как большинство изоляционных материалов допускают достаточно резкое охлаждение. Исключением является полиэтилен, требующий постепенного охлаждения. При охлаждении изоляции в охлаждающей ванне понижение температуры начинается с поверхности. В связи с этим охлаждение изоляции из полиэтилена производится ступенчато до температуры, при которой охлажденная экструдированная изоляция не будет деформироваться или повреждаться на приемном барабане [2, 3]. На кабельных предприятиях экструдированное покрытие охлаждают до температур (40...50) °С для соблюдения требований техники безопасности [4].

Длина охлаждающей ванны зависит от скорости экструзии, диаметра жилы (или кабеля) и толщины

изоляции (оболочки). Длина ванны для охлаждения изоляции на основе кристаллических полимеров больше, чем для охлаждения изоляции из аморфных полимеров, так как процесс кристаллизации является экзотермическим [2, 3].

Скорость перемотки зависит от диаметра экструдированных кабелей. Так, для телефонных кабелей, диаметр проводника у которых не превышает 1 мм, скорость приема является одной из высоких и достигает 1200 м/мин. По мере увеличения диаметра жилы скорость приема уменьшается и для силовых кабелей составляет порядка (6-30) м/мин. При охлаждении полиэтиленовой изоляции скорость лимитируется длиной охлаждающей ванны.

Существующие методы расчета режимов охлаждения экструдированной изоляции позволяют рассчитывать скорость перемотки кабелей при известной длине ванны охлаждения либо длину ванны при заданной скорости перемотки [5, 6] без учета распределения температуры по всей толщине изоляции в неустойчившемся тепловом режиме.

**Постановка проблемы.** Технологические параметры режима охлаждения влияют на внутреннюю структуру полимера: чем меньше скорость охлаждения, тем выше содержание кристаллической фазы в полимерной изоляции. При быстром охлаждении релаксационные процессы не успевают завершиться, происходит нарушение внутреннего морфологического строения, влекущего к образованию неравновесной структуры полимерной изоляции с преобладанием аморфной фазы [1-3]. Количественное соотношение кристаллической и аморфной фаз в конечном итоге определяет тепловые, механические и электрические характеристики экструдированной изоляции.

© А.В. Беспрозванных, И.А. Мирчук, А.Г. Кессаев

При резком охлаждении возможно также образование внутренних пустот в толще экструдированной изоляции. В наибольшей степени этот процесс вероятен при охлаждении полиэтилена, у которого объем расплава при температуре 200 °С практически на 25 % выше, чем при 20 °С: резкое изменение объема происходит вблизи его температуры плавления [7]. Для полиэтилена характерно большое значение теплового коэффициента расширения, максимальное значение которого находится в диапазоне температур (90-125) °С. В результате происходит неравномерное сокращение объема верхних и внутренних слоев изоляции, особенно для кабелей со значительной толщиной изоляции. Резкое охлаждение полиэтилена приводит к образованию трещин, воздушных включений как между изоляцией и токопроводящей жилой, так и в слоях, расположенных вблизи жилы.

Так, в [5] определена степень охлаждения кабеля при заданной температуре на входе в ванну и температуре охлаждающей воды при конвективном теплообмене между поверхностью изоляции и охлаждающей водой [8].

Для силовых кабелей важно получить распределение температурного поля по толщине экструдированной полиэтиленовой изоляции, которое определяется температуропроводностью полиэтиленовой изоляции с учетом температуры подогрева токопроводящей жилы и температуры охлаждающей воды.

**Целью статьи** является обоснование технологических параметров режима охлаждения силовых кабелей на основании расчета тепловой схемы замещения изолированной полиэтиленом токопроводящей жилы в неустановившемся тепловом режиме.

**Тепловая схема замещения экструдированной изолированной жилы в переходном тепловом режиме.** В общем случае расчет температурного поля по толщине изоляции при ее охлаждении сводится к заданию условий однозначности: геометрических условий, характеризующих форму и размеры экструдированной токопроводящей жилы; физических условий, характеризующих теплопроводность, теплоемкость, плотность жилы, изоляции и охлаждающей среды соответственно; начальных условий, характеризующих распределение температуры в начальный момент времени (при  $t = 0$ ); граничных условий, характеризующих взаимодействие рассматриваемой экструдированной изоляции с окружающей средой [9].

Для расчета распределения температуры в толще экструдированной полиэтиленовой изоляции в разные моменты времени в зависимости от температуры охлаждающей воды воспользуемся методом электротепловых аналогий [9]. Между тепловой и электрической схемами замещения есть полная аналогия, позволяющая для расчета тепловых схем использовать известные методы теории электрических цепей. Аналогом потенциала в тепловой схеме замещения является температура ( $T$ ), а аналогом тока – тепловой поток ( $P$ ) на единицу длины изоляции по ее оси (на единицу длины кабеля).

Тепловую схему замещения изоляции силовых кабелей (рис. 1) рассчитаем с помощью метода дискретных резистивных схем замещения [9]. Для этого тепловые величины заменим их электрическими аналогами. Затем рассчитаем тепловую схему и определим искомую температуру [9].

Тепловая схема замещения (рис. 1) отражает: теплоемкость жилы  $C_g$ ; зависящие от температуры (нелинейные) тепловые сопротивления  $R_t$  и тепловые емкости  $C_t$  каждого слоя изоляции (от 1 до  $M$ ), тепловое сопротивление теплоотдачи  $R_{to}$  с поверхности изоляции провода, а также действие источника нагрева провода до температуры среды  $T_w$ .

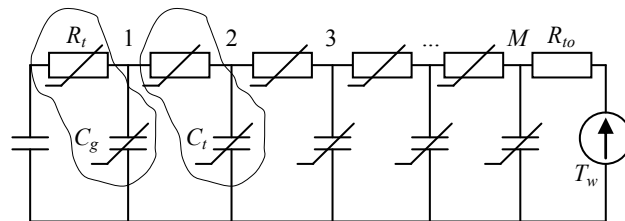


Рис. 1. Тепловая схема замещения экструдированной изолированной жилы в переходном тепловом режиме

Для расчета температурного поля в процессе охлаждения движущейся изолированной токопроводящей жилы примем следующие допущения:

- 1) изолированная жила считается симметричной относительно своей оси;
- 2) жила движется с постоянной скоростью;
- 3) материал жилы и изоляции является изотропным;
- 4) не учитываются изменения размеров провода, вызванные усадкой изоляции;
- 5) пренебрегается теплопередача вдоль токопроводящей жилы;
- 6) не учитываются внутренние источники тепла, выделяющегося при фазовом переходе полимера при охлаждении изоляции;
- 7) каждый элемент имеет постоянные по его объему электрические и физические характеристики.

Задавшись начальными значениями температуры при выходе экструдированной полиэтиленовой изоляции из вулканизационной камеры в момент времени  $t = 0$ , а именно: подогретой жилы, изоляции (температура которой по всей толщине и на поверхности – одинакова), охлаждающей воды, можно получить распределение температуры по толщине изоляции в разные моменты времени.

**Методика расчета.** От тепловой схемы замещения (рис. 1) переходим к схеме замещения метода дискретных резистивных схем замещения (ДРСЗ) (рис. 2) [10], в соответствии с которой емкости представляются источниками ЭДС  $E_{cg}$ ,  $E_{ct}$  и резисторами  $R_{cg}$ ,  $R_{ct}$ . В источниках ЭДС «запоминаются» температуры на емкостях в предыдущий ( $k-1$ )-й момент времени («старая» температура). Нахождение «новой» температуры в текущий  $k$ -й момент времени через интервал времени  $h$  определяется как

$$T_k \approx \frac{h}{C} \cdot P + T_{k-1}. \quad (1)$$

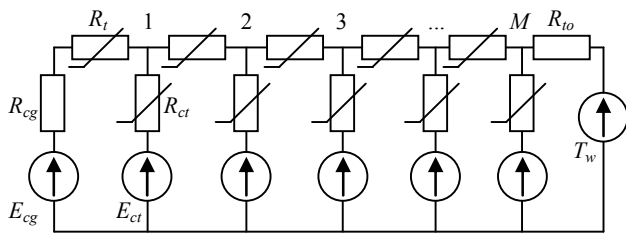


Рис. 2. Дискретная резистивная схема замещения экструдированной изолированной жилы в переходном тепловом режиме

Расчет ДРСЗ выполним методом узловых потенциалов [9, 10]. Система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) метода узловых потенциалов для случая  $M$  узлов (число слоев по толщине изоляции) имеет вид [9]

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & \dots & G_{1M} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & \dots & G_{2M} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & \dots & G_{3M} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & \dots & G_{4M} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} & G_{54} & \dots & G_{5M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{M-1,1} & G_{M-1,2} & G_{M-1,3} & G_{M-1,4} & \dots & G_{M-1,M} \\ G_{M1} & G_{M2} & G_{M3} & G_{M4} & \dots & G_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \\ \dots \\ \varphi_{M-1} \\ \varphi_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ \dots \\ J_{M-1} \\ J_M \end{pmatrix}, (2)$$

где  $J_1 - J_M$  – узловые «токи» (тепловой поток);  $J_1 - J_{M-1} = 0$ ;

$J_M = \frac{T_c}{R_{to}}$ ;  $G_{11} = \frac{1}{R_t + R_{cg}} + \frac{1}{R_{ct}} + \frac{1}{R_t}$  – узловая про-

водимость первого узла (сумма проводимостей ветвей, сходящихся в первом узле);  $G_{22} = \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_{ct}} + \frac{1}{R_t}$  –

узловая проводимость второго узла;  $G_{33} = G_{22}$ ;  $G_{44} = G_{22}$ ;  $G_{55} = G_{22}$ ; ...  $G_{(M-1)(M-1)} = G_{22}$ ;

$G_{MM} = \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_{ct}} + \frac{1}{R_{to}}$ ;  $G_{12} = -\frac{1}{R_t}$  – взаимная про-

водимость между 1-м и 2-м узлами (взятая со знаком «минус» суммарная проводимость между 1-м и 2-м узлами);  $G_{23} = G_{34} = G_{45} = \dots = G_{12}$ ;  $G_{13} = G_{14} = G_{15} = \dots = G_{1M} = 0$ .

В результате решения трехдиагональной СЛАУ (2) методом прогонки и нахождения на каждом шаге дискретизации (временном интервале) потоков тепловой мощности в ветвях тепловой схемы замещения, температура на тепловых емкостях определяется температура в каждом слое изоляции. Порядок разрешающей системы линейных алгебраических уравнений определяется произведением числа узлов на число шагов дискретизации.

**Влияние технологических режимов охлаждения и конструктивных параметров кабелей на распределение температуры по толщине экструдированной полиэтиленовой изоляции.** Расчет распределения температуры по толщине изоляции выполнен при заданных теплофизических характеристиках (коэффициенте теплопроводности  $\lambda$ , удельной теплоемкости  $c$ , плотности  $\rho$ ): медной жилы  $\lambda_g = 200$  Вт/(м·К);  $c_g = 420$  Дж/(кг·К);  $\rho_g = 8300$  кг/м<sup>3</sup> [11, 12].

Для полиэтилена: плотность принята равной  $\rho_d = 940$  кг/м<sup>3</sup>; зависимости коэффициента теплопро-

водности и удельной теплоемкости от температуры заданы в виде аппроксимирующих функций [1, 7]:

$$\lambda_d = 0,35 \text{ Вт/(м·К) при } T \geq 120 \text{ °C};$$

$$\lambda_d = 0,41 - 0,001 \cdot T \text{ при } T < 120 \text{ °C};$$

$$c_d = 3150 \text{ Дж/(кг·К) при } T \geq 115 \text{ °C};$$

$$c_d = 3750 - 4,78 \cdot T \text{ при } T < 115 \text{ °C};$$

Теплофизические характеристики охлаждающей воды, необходимые для расчета теплового сопротивления  $R_{to}$ :  $\lambda_w = 0,24$  Вт/(м·К);  $c_w = 5000$  Дж/(кг·К);  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup> [5].

Расчеты выполнены для начального значения температуры изоляции 200 °C в момент времени  $t = 0$  при выходе экструдированной полиэтиленовой изоляции из вулканизационной камеры.

**1. Влияние температуры охлаждающей среды на распределение температуры.** На рис. 3 приведена динамика изменения во времени распределения температуры в полиэтиленовой изоляции толщиной 2 мм ( $i$  – номер слоя по толщине изоляции, считая от жилы) в зависимости от температуры охлаждающей воды. Температура воды в охлаждающей ванне равна соответственно:

- 30 °C (рис. 3,а, кривая 1 рис. 3,з);
- 60 °C (рис. 3,б, кривая 2 рис. 3,з);
- 90 °C (рис. 3,в, кривая 3 рис. 3,з).

Результаты расчета выполнены для подогретой до 90 °C токопроводящей медной жилы сечением 95 мм<sup>2</sup>. Как показывают расчеты (сравни рис. 3,в и рис. 4), подогрев жилы до 90 °C уменьшает вероятность образования воздушных полостей возле жилы, обеспечивает более равномерное распределение температуры по толщине изоляции за то же время переходного процесса и улучшает адгезию расплава полимера к металлическому проводнику.

При температуре охлаждающей воды 30 °C наблюдается наиболее резкое охлаждение изоляции (сравни кривую 1 с кривой 3 на рис. 3,з). Уменьшение температуры начинается с поверхности изоляции (см. рис. 3, слой  $i = 100$  при  $t = 1$  с). Поверхностный слой, охлаждаясь за время  $t = 5$  с, стремится сократить свой объем, а внутренние, еще не остывшие, препятствуют этому сокращению. При этом поверхностный слой затвердевает под действием радиального давления и находится в растянутом состоянии с замороженными внутренними напряжениями. При последующем охлаждении внутренних слоев их объем сокращается, но это происходит в условиях, когда наружные слои уже отвердели. Сокращение объема может происходить неравномерно, а по наиболее механически слабым местам, т.е. там, где изоляция охлаждается в последнюю очередь.

Вероятность образования пузырей и пустот у жилы, температура которой выше в сравнении с внешними слоями изоляции, значительно возрастает. Время, необходимое для завершения переходного теплового процесса в первой секции охлаждающей ванны с температурой воды 90 °C (рис. 3,в, кривая 3 рис. 3,з, кривая 1 на рис. 5), составляет около 100 с.

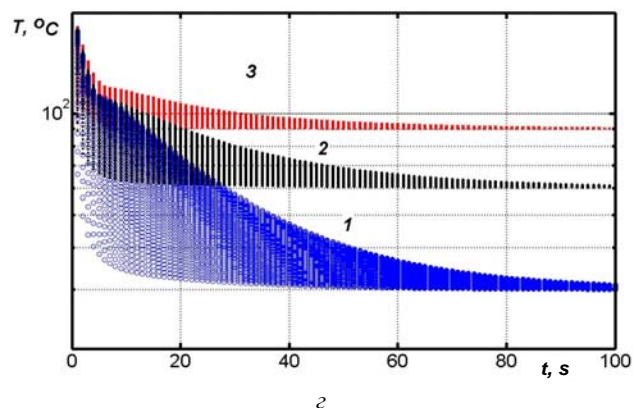
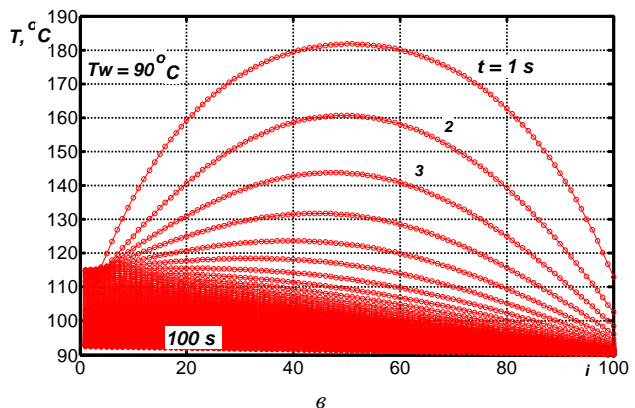
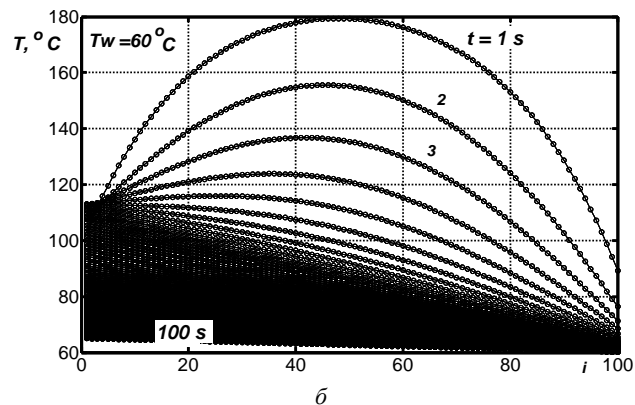
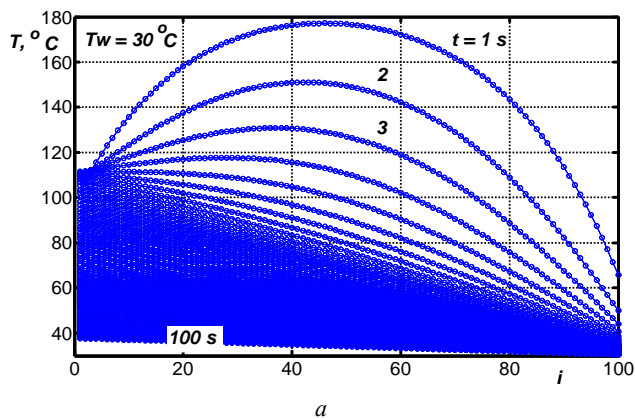


Рис. 3. Влияние температуры охлаждающей воды на динамику изменения во времени распределения температуры по толщине полиэтиленовой изоляции

За такое время по всей толщине изоляции устанавливается, практически, одинаковая температура, равная температуре охлаждающей воды 90 °С, что уменьшает вероятность образования полостей и кон-

центраций термомеханических напряжений в толще полиэтиленовой изоляции.

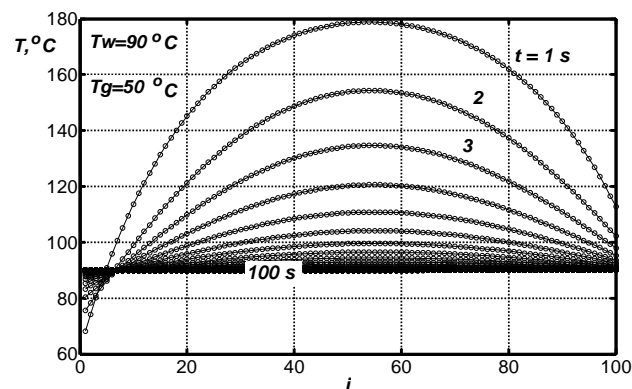


Рис. 4. Динамика изменения распределения температуры по толщине изоляции при температуре жилы, равной 50 °С

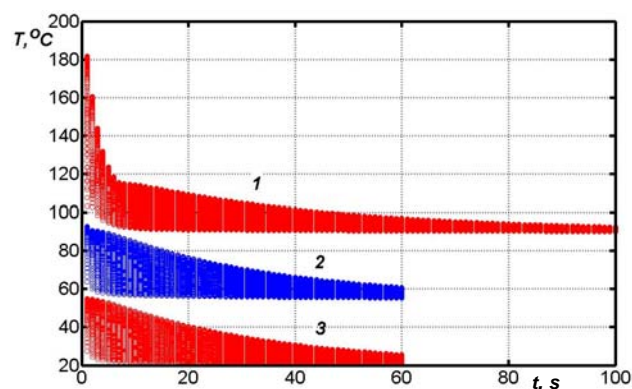


Рис. 5. Временная диаграмма распределения температуры по толщине полиэтиленовой изоляции при ступенчатом охлаждении в трехсекционной ванне

Время переходного процесса можно рассматривать в качестве критерия для обоснования соотношения между длиной  $L_1$  (м) первой секции охлаждающей ванны и скоростью приема  $v$  (м/с). Для рассмотренного случая значение  $L_1/v$  составляет 100 с. При скорости перематки  $v = 0,2$  м/с = 12 м/мин длина первой секции должна быть равной 20 м. Длина ванны может быть уменьшена, по крайней мере, в два раза при той же скорости приема: при такой длине перепад температуры между внутренними и внешними слоями изоляции не превышает 10 °С (см. рис. 5, кривая 1).

Охлаждение изоляции во второй и третьей секциях производится водой, температура которой равна 50 °С и 20 °С соответственно, за значительно меньшее время (сравни кривую 1 и кривые 2, 3 на рис. 5). Длина второй секции  $L_2$  равна 10 м, третьей (для обеспечения температуры изоляции порядка 40 °С) –  $L_3 = 4$  м. Таким образом, общая длина трехсекционной охлаждающей ванны составит 30 м. Такие параметры режима охлаждения обеспечивают меньшую вероятность образования пустот, воздушных включений и трещин в толще изоляции. Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в [1, 5].

**2. Влияние конструктивных параметров кабелей на распределение температуры по толщине экструдированной полиэтиленовой изоляции.** Влияние диаметра токопроводящей жилы на распре-

деление температуры по толщине изоляции в разные моменты времени показано на рис. 6.

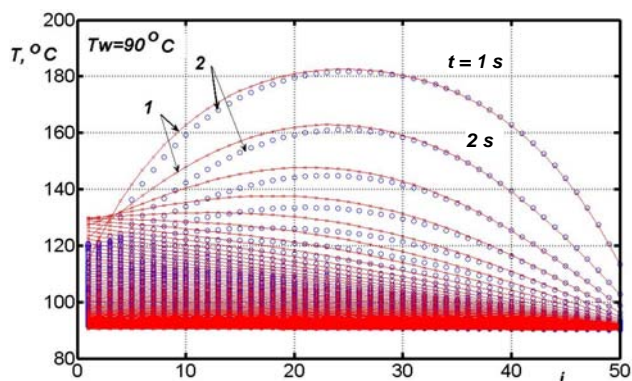


Рис. 6. Влияние сечения токопроводящей жилы на распределение температуры по толщине полиэтиленовой изоляции

Толщина изоляции в обоих случаях равна 2 мм. Кривая 1 соответствует сечению медной жилы  $95 \text{ мм}^2$ , кривая 2 –  $240 \text{ мм}^2$ . В начальный момент охлаждения для внутренних слоев изоляции, расположенных возле жилы большего сечения, температура меньше в сравнении с распределением температуры для изоляции с жилой меньшего сечения. В дальнейшем различие нивелируется, что позволяет использовать для охлаждения ванну одинаковой длины.

Увеличение толщины изоляции приводит к увеличению времени переходного теплового процесса, а значит и длины первой охлаждающей секции (рис. 7). Для сохранения неизменной длины первой секции охлаждающей ванны при охлаждении кабелей с большей толщиной изоляции необходимо соответственно уменьшать скорость приема.

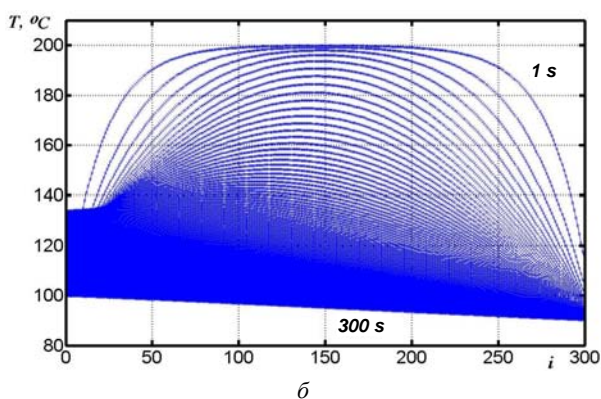
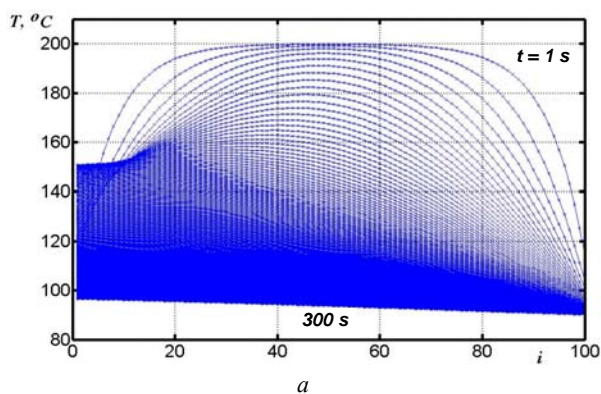


Рис. 7. Влияние числа слоев на распределение температуры по толщине изоляции

На рис. 7 показано влияние числа слоев на распределение температуры:  $M = 100$  (рис. 7,а),  $M = 300$  (рис. 7,б). Сечение жилы  $95 \text{ мм}^2$ , толщина изоляции 6 мм. Увеличение числа слоев по толщине изоляции повышает точность расчета на 8 %.

#### Выводы.

Разработана методика расчета технологических параметров режима охлаждения силовых кабелей. Методика основывается на расчете тепловой схемы замещения изолированной полиэтиленом токопроводящей жилы в неустановившемся тепловом режиме с учетом зависимости от температуры теплового сопротивления и теплоемкости методами дискретных резистивных схем замещения и узловых потенциалов.

Обоснована длительность переходного процесса, соответствующая достижению одинаковой температуры по всей толщине изоляции силовых кабелей разного конструктивного исполнения. Показано, что длительность переходного процесса можно рассматривать в качестве критерия при определении длины секций охлаждающей ванны в зависимости от скорости экструдирования (приема).

Установлено влияние диаметра токопроводящей жилы и толщины полиэтиленовой изоляции на режим охлаждения силовых кабелей.

Предложенная методика может быть применена для выбора технологических режимов охлаждения других типов кабелей, например, симметричных, радиочастотных и оптических.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов В.М., Пешков И.Б., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
3. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
4. Рао Натти С., Шотт Ник Р. Технологические расчёты в переработке пластмасс / Практическое руководство. Пер. с англ. под ред. О.И. Абрамушкиной. – СПб.: Профессия, 2013. – 200 с.
5. Хренков Н.Н. Расчет режимов охлаждения движущегося кабеля // Кабели и провода. – 2018. – №1. – С. 20-25.
6. Вознюк В.Т., Кравченко Ю.О., Микulyонюк І.О. Підвищення ефективності охолодження гофрованих полімерних труб // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – Т.5. – №8(53). – С. 46-50.
7. Казаков А.В., Петренко А.А. Математическое моделирование процесса плавления полимера // Фундаментальные исследования. – 2015. – №10-2. – С. 264-267.
8. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat solids. – Second Ed. Clarendon Press, London. – 2003. – 510 p.
9. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Харьков: НТУ «ХП». – 2012. – 108 с.
10. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.
11. Коздоба Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
12. Аметистов Е.В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.

## REFERENCES

1. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodnyy S.D. *Osnovy kabelnoy tehniki* [Basics of cable technology]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 432 p. (Rus).
  2. Kim V.S. *Teoriya i praktika ekstruzii polimerov* [Theory and practice of polymer extrusion]. Moscow, Khimiya, Kolos Publ., 2005. 568 p. (Rus).
  3. Rauvendaal K. *Ekstruziya polimerov* [Polymer extrusion]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2006. 768 p. (Rus).
  4. Rao Natti S., Shott Nik R. *Tekhnologicheskie raschety v pererabotke plastmass* [Technological calculations in plastics processing]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2013. 200 p. (Rus).
  5. Khrenkov N.N. Calculation of the cooling modes of a moving cable. *Cables and wires*, 2018, no.1, pp. 20-25. (Rus).
  6. Voznyuk V.T., Kravchenko Yu.O., Mikulyonok I.O. Increase cooling corrugated polymer pipes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, vol.5, no.8(53). –pp. 46-50. (Rus).
  7. Kazakov A.V., Petrenko A.A. Mathematical modeling of the polymer melt. *Fundamental research*, 2015, no.10(part 2), pp. 264-267. (Rus).
  8. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat solids. Second Ed.* Clarendon Press, London, 2003. 510 p.
  9. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G. *Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolatsionnykh konstruksii* [Mathematical models and methods of calculation of electrical designs]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2012. 108 p. (Rus).
  10. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-kh t. Uchebnik dlia vuzov* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols.]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 463 p. (Rus).
  11. Kozdoba L.A. *Elektricheskoe modelirovanie iavlenii teplo- i massoperenosa* [Electrical modeling of heat and mass transfer phenomena]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 296 p. (Rus).
  12. Ametistov E.V. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskiiy eksperiment* [Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment]. Energoatomizdat Publ., 1982. 512 p. (Rus).
- Поступила (received) 11.03.2019*
- Беспрозванных Анна Викторовна*<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
*Мирчук Игорь Анатольевич*<sup>2</sup>, аспирант,  
*Кессаев Александр Геннадиевич*<sup>1</sup>, к.т.н.,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 057 7076010,  
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua  
<sup>2</sup>Приватное акционерное общество  
«Украинский научно-исследовательский институт  
кабельной промышленности»,  
71101, Запорожская обл., Бердянск, ул. Промышленная, 2-Р,  
тел/phone +38 066 8288554,  
e-mail: garik710@ukr.net

*G.V. Bezprozvannykh*<sup>1</sup>, *I.A. Mirchuk*<sup>2</sup>, *A.G. Kyessayev*<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>Private Joint Stock Company «Ukraine Scientific-Research  
Institute of Cable Industry»,  
2-Р, Promychnennaya Str., Berdyansk, Zaporozhye Region,  
71101, Ukraine.

### **Technological parameters of the cooling mode of polymer insulation of power cables.**

**Introduction.** The cooling mode of polymer insulation after application to the extruder is one of the main factors determining cable performance. Theoretically, it is ideal to cool the insulation when the temperature of the cooling medium is equal to the melting point of the insulation material: in this case, the probability of formation of voids in the insulation is less. The cooling process is usually not subject to stringent requirements, since most insulating materials allow for quite sharp cooling. The exception is polyethylene, which requires gradual cooling. When the insulation is cooled in a cooling bath, the temperature decrease starts from the surface. In this regard, the cooling of the insulation of polyethylene is carried out in steps to a temperature at which the cooled extruded insulation will not be deformed or damaged on the receiving drum. Polyethylene is characterized by a large value of thermal expansion coefficient, the maximum value of which is in the temperature range (90-125) °C. As a result, there is an uneven reduction in the volume of the upper and inner insulation layers, especially for cables with a considerable insulation thickness. The rapid cooling of polyethylene leads to the formation of cracks, air inclusions both between the insulation and the conductive core, and in the layers located near the core. **Purpose.** The substantiation of the technological parameters of the cooling mode of power cables based on the calculation of the thermal equivalent circuit of a conductive core insulated with polyethylene in transient thermal mode. **Methodology.** The calculation of the temperature distribution in the thickness of extruded polyethylene insulation at different points in time, depending on the temperature of the cooling water, is made by the method of electrothermal analogies. There is a transition from the thermal equivalent circuit of power cables to the equivalent circuit of the discrete resistive equivalent circuit method, which is calculated using the nodal potential method. As a result of solving a three-diagonal system of linear algebraic equations by sweeping and finding at each discretization step (time step) thermal power fluxes in the branches of the thermal equivalent circuit, the temperature in the thermal capacitances determines the temperature in each insulation layer. **Practical value.** The duration of the transition process, corresponding to the achievement of the same temperature throughout the thickness of the insulation, can be considered as a criterion in determining the length of the cooling bath sections depending on the extrusion (reception) rate. References 12, figures 6.

**Key words:** cooling mode, polyethylene insulation, thermal equivalent circuit, discrete resistive equivalent circuit method, transient mode, nodal potentials method, system of linear algebraic equations, cooling bath length.