

УДК 621.316.9

ДИНАМИКА НАГРЕВА МНОГОЖИЛЬНОГО ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОВОДНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Аушев И.Ю.*, Станкевич Ю.А.**, к. ф.-м. н., Степанов К.Л.**, к. ф.-м. н., доцент

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

**Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

*e-mail: asb@kii.gov.by

**e-mail: kls@hmti.ac.by

В работе продолжено, начатое в [1], рассмотрение процесса нагрева кабеля при протекании электрического тока. Приведены результаты решения нестационарной задачи о динамике нагрева одножильного и двухжильного изолированных кабелей. Численная модель учитывает зависимость от температуры теплофизических свойств проводника и его удельного сопротивления, а также влияние температуры изоляции на ее теплопроводность и теплоотдачу в окружающую среду. Дано сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

This work continues begun in [1] consideration of the process of heating cable accompanying electric current. We describe the results of time-dependent solution for the non-stationary heating for single-conductor and twin-core cable. The numerical model takes into account the temperature dependence of the thermophysical properties of the conductor and its specific resistance, as well as the effect of temperature on the insulation of thermal conductivity and heat exchange with an environment. The paper contains a comparison of numerical results with experimental data.

(Поступила в редакцию 4 июля 2012 г.)

ВВЕДЕНИЕ

В нашей предыдущей работе [1] были исследованы стационарные режимы нагрева одножильного изолированного медного кабеля электрическим током, при которых энерговыделение в проводнике компенсируется потерями тепла в изоляцию и далее в окружающую среду. Стационарное приближение позволило определить зависимость нагрева проводника и изоляции при длительно протекающем токе от его величины, сечения токопроводящей жилы, ее проводимости, теплофизических свойств проводника и изоляции. Предельно допустимые температуры зависят, главным образом, от условий теплостойкости изоляции и могут варьироваться в довольно широком интервале 65-150 °С для различной изоляции (резина, поливинилхлорид, бумага) при температуре окружающей среды около 20 °С. Сравнение оценок нагрева проводников, выполненных в [1], с регламентами ПУЭ показывает, что номинальным при длительной нагрузке токам отвечает перегрев проводника относительно температуры окружающей среды в диапазоне 30-60 °С.

В настоящей работе проведенный нами анализ [1] обобщается в следующих направлениях. Во-первых, учитывается зависимость теплофизических и электрических характеристик от температуры. Это делает исходные уравнения нелинейными и требует для их решения применения численных методов. Во-вторых, рассматривается нестационарная задача. Такая постановка позволяет исследовать динамику процесса нагрева кабеля. В-третьих, рассматриваются не только одножильные изолированные кабели, но и двухжильные кабели с общей оболочкой. Кроме того, проводится сравнение результатов численного моделирования с имеющимися экспериментальными данными по нагреву различных кабелей токами разной интенсивности.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ НАГРЕВА ОДНОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ

При протекании электрического тока заданной силы температура первоначально холодного проводника возрастает. В результате теплопроводности часть выделившейся энергии поступает в изоляцию, которая начинает нагреваться. Поскольку температура внешней поверхности оболочки кабеля становится выше температуры окружающего воздуха, благодаря естественной конвекции начинается передача тепла из кабеля в окружающую среду. В простейшем случае одножильного цилиндрического проводника с изоляцией нестационарный нагрев описывается уравнением баланса энергии, которое имеет вид [1]:

$$\rho_M c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rS) + Q, \quad S = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad Q = \frac{\rho I^2}{S_w^2}. \quad (1)$$

Здесь ρ_M – плотность материала проводника (изоляции), кг/м³; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); T – температура, К; S – плотность теплового потока, Вт/м²; Q – объемная мощность джоулевого нагрева, Вт/м³; ρ – удельное сопротивление материала жилы, Ом·м; I – сила тока, А; S_w – площадь сечения жилы, м². Величины T и S зависят не только от координаты r , но и от времени t . Различие теплофизических свойств и сопротивления проводника и изолятора в уравнении (1) учитывается следующим образом

$$0 \leq r \leq R_w: \quad \rho_M = \rho_{\text{П}}, \quad c_p = c_{p\text{П}}, \quad \lambda = \lambda_{\text{П}}, \quad Q = \frac{\rho I^2}{S_w^2}. \quad (2)$$

$$R_w \leq r \leq R: \quad \rho_M = \rho_{\text{И}}, \quad c_p = c_{p\text{И}}, \quad \lambda = \lambda_{\text{И}}, \quad Q = 0. \quad (3)$$

В (2)–(3) R_w и R – соответственно радиусы жилы и кабеля, м.

Решение уравнений (1) должно удовлетворять граничным условиям на оси проводника и на поверхности кабеля [1]:

$$r = 0: \quad S = 0, \quad r = R: \quad S = \alpha(T_{\text{И}}(R) - T_0), \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции, Вт/м²·К;

$T_{\text{И}}(R)$ – температура поверхности изоляции, К;

T_0 – температура окружающей среды (воздуха), К.

Начальное условие состоит в том, что в момент включения тока температура везде одинакова и равна температуре окружающей среды

$$t = 0: \quad 0 \leq r \leq R, \quad T(r) = T_0. \quad (5)$$

Задача о нагреве одножильного кабеля в постановке (1)–(5) позволяет рассчитать динамику изменения температуры не только при неизменной силе тока, но и при заданной его зависимости от времени.

В наибольшей степени нагрев жилы и кабеля в целом определяется температурной зависимостью электрического сопротивления проводника и коэффициентом теплообмена кабеля с окружающей средой. В диапазоне температур медной жилы до 200 °С удельное сопротивление можно представить в виде:

$$\rho(T) = \rho(T_0)[1 + 0,0043(T - T_0)], \quad (6)$$

где $T_0 = 20$ °С, а $\rho(T_0) = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Расчетная зависимость коэффициента теплообмена α , характеризующего плотность теплового потока с поверхности кабеля в воздухе,

$$S = \alpha(T_{\text{н}}(R) - T_0) \quad (7)$$

приведена в таблице. Коэффициент теплообмена, обусловленный свободной конвекцией, является функцией толщины кабеля и перепада температур кабеля и воздуха.

Приведем в качестве примера температурную зависимость коэффициента теплообмена одножильного цилиндрического кабеля толщиной $D = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м

$$\alpha = 5,09 + 3,49[1 - \exp(-\Delta T / 7,45)] + 7,91[1 - \exp(-\Delta T / 124,6)]. \quad (8)$$

Таблица – Зависимость коэффициента теплообмена α от перепада температур и толщины кабеля

$R, \text{ м}$	$T(R) - T_0, \text{ }^\circ\text{C}$				
	1	3	10	30	100
$5,0 \cdot 10^{-4}$	17,5	19,4	22,3	25,8	31,2
$1,0 \cdot 10^{-3}$	10,8	12,3	14,6	17,3	21,4
$1,5 \cdot 10^{-3}$	8,4	9,7	11,7	14,1	17,6
$2,0 \cdot 10^{-3}$	7,0	8,3	10,1	12,4	15,6
$2,5 \cdot 10^{-3}$	6,2	7,4	9,1	11,2	14,2
$3,0 \cdot 10^{-3}$	5,6	6,8	8,4	10,4	13,3
$4,0 \cdot 10^{-3}$	4,9	5,9	7,5	9,4	12,0
$5,0 \cdot 10^{-3}$	4,4	5,4	6,9	8,7	11,2

При численном решении дифференциальные уравнения (1) с граничными и начальными условиями (4)–(5) заменяются системой конечно-разностных уравнений вида:

$$(rS)_{i+1}^{n+1} - (rS)_i^{n+1} - A_i T_{i+1/2}^{n+1} = -B_i \quad (a), \quad C_{i+1} S_{i+1}^{n+1} - T_{i+3/2}^{n+1} + T_{i+1/2}^{n+1} = 0 \quad (б), \quad (9)$$

которые связывают температуры и тепловые потоки в соседних пространственных точках и позволяют рассчитать их значения на $n+1$ временном слое (в момент t_{n+1}), если они известны в момент t_n . Все детали построения разностной схемы и методов решения полученных линейных уравнений излагаются в работе авторов [2]. Здесь лишь отметим, что используется метод потоков прогонки [3], причем на каждом временном слое проводится итерация для учета зависимости теплофизических и электрических свойств проводника и изоляции от температуры.

В качестве примера рассмотрим динамику нагрева одиночного изолированного кабеля токами разной силы. Параметры кабеля следующие [4]: диаметр медной жилы $2,6 \cdot 10^{-3}$ м, толщина поливинилхлоридной изоляции $7 \cdot 10^{-4}$ м, толщина аналогичной оболочки $1,2 \cdot 10^{-3}$ м.

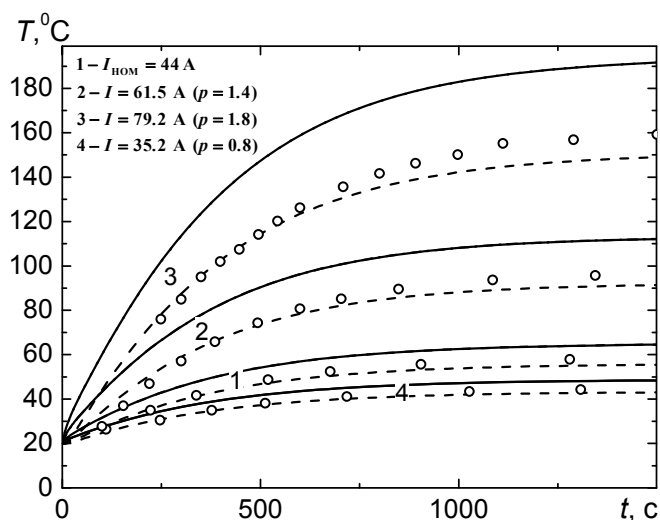


Рисунок 1 – Динамика температуры жилы и поверхности кабеля для длительных токов различной силы

В расчетах радиус жилы принят равным $R_w = 1,3 \cdot 10^{-3}$ м, а суммарная толщина оболочки $\Delta R = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м, так что радиус кабеля $R = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м.

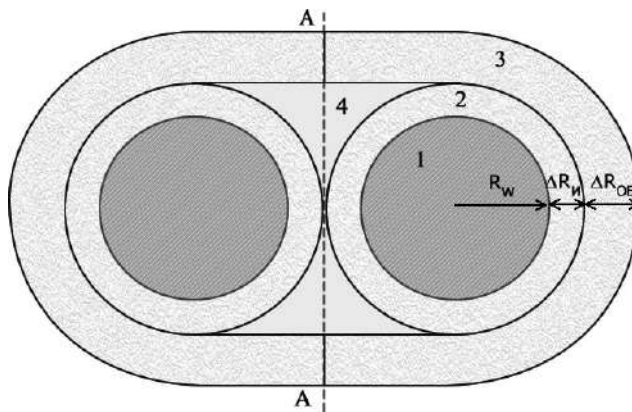
Результаты расчета представлены на рис. 1. Здесь сплошными кривыми показано изменение температуры жилы, пунктиром – температуры внешней поверхности кабеля. Кривые 1-4 отвечают длительному действию токов различной силы. Кривые 1 соответствуют номинальному току с $I = 44 \text{ А}$, кривые 2 и 3 – токам $I = 61,6 \text{ А}$ и $79,2 \text{ А}$ (перегрузка равна $p = I/I_{\text{ном}} = 1,4$ и $1,8$), 4 – току ниже номинального $I = 35,2 \text{ А}$ ($p = 0,8$). При номинальном токе силой $I_{\text{ном}} = 44 \text{ А}$ жила нагревается до температуры $65 \text{ }^\circ\text{C}$, а поверхность кабеля – до $55,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ростом величины $p = I/I_{\text{ном}}$ температуры нагрева возрастают, а при уменьшении p снижаются. Оценка температуры поверхности кабеля, данная на рис. 1 кружками, получена по температуре жилы согласно стационарной оценке [1]

$$T_R = T_w + \frac{QS_w}{2\pi\lambda_{\text{и}}} \ln \frac{R_w}{R}, \quad (10)$$

причем здесь учтена зависимость удельного сопротивления жилы от температуры. Тем не менее, наблюдается некоторое различие в температуре поверхности кабеля – оценка (10) дает несколько завышенное ее значение, по сравнению с нестационарным расчетом на стадии установления, на стадии нагрева оценка температуры T_R по (10) практически совпадает с результатами численного расчета.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ НАГРЕВ ДВУЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ

Моделирование динамики нагрева двужильного кабеля рассмотрим на примере кабеля ВВГ2х4. Сечение кабеля показано на рис. 2. Диаметр медной жилы $2R_w = 2,6 \cdot 10^{-3}$ м, толщина изоляции $\Delta R_{\text{И}} = 7 \cdot 10^{-4}$ м, толщина оболочки $\Delta R_{\text{ОБ}} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м. Суммарная минимальная толщина оплетки $\Delta R = \Delta R_{\text{И}} + \Delta R_{\text{ОБ}} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м.



1 – медная жила, 2 – изоляция, 3 – оболочка кабеля, 4 – воздушный промежуток, AA – линия симметрии

Рисунок 2 – Сечение кабеля ВВГ2х4

Для численного решения двумерной нестационарной задачи нагрева двужильного кабеля используется программа FlexPDE, основанная на методе конечных элементов. Она предназначена для моделирования различных физических задач, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных в одномерном, двумерном и трехмерном случаях [5].

Численное моделирование тепловой задачи проводится в области, занимаемой жилой, изоляцией и оболочкой с учетом условия симметрии по линии AA. Промежуток области между оболочкой и изоляцией (на рис. 1 область 4) заполнен воздухом. Теплофизические параметры его задаются постоянными и соответствующими условиям при температуре 20 °С – плотность $1,23 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м К)}$, теплоемкость 10^3 Дж/(кг·К) . Физические свойства изоляции и оболочки предполагаются одинаковыми, соответствующими поливинилхлориду [1].

На внешней границе кабеля задается условие свободно-конвективного теплообмена с окружающей средой, на линии симметрии граничное условие состоит в равенстве нулю поперечной компоненты теплового потока. В момент включения тока кабель имеет температуру внешнего воздуха.

Коэффициент свободно-конвективного теплообмена двужильного кабеля можно аппроксимировать соотношением для горизонтального цилиндра эллиптического сечения [6]. В зависимости от ориентации большой оси различают горизонтально и вертикально расположенный эллипс. Для горизонтально расположенного эллипса с размером большой полуоси $b = 5,2 \cdot 10^{-3}$ м, а отношением полуосей $c / b = 0,615$ среднее значение числа Нуссельта равно

$$\text{Nu}_{\text{cp}} = 0,343 \text{Gr}_b^{1/4}, \quad \text{Gr} = \frac{gb^3\beta(T_c - T_0)}{\nu^2}, \quad (11)$$

где Gr – число Грасгофа [1];
 g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;
 b – большая полуось, м;
 T_c – температура поверхности, К;
 T_0 – температура окружающей среды, К;
 ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, m^2/c ;
 β – температурный коэффициент объемного расширения $\beta = (273 + T_0)^{-1}$.

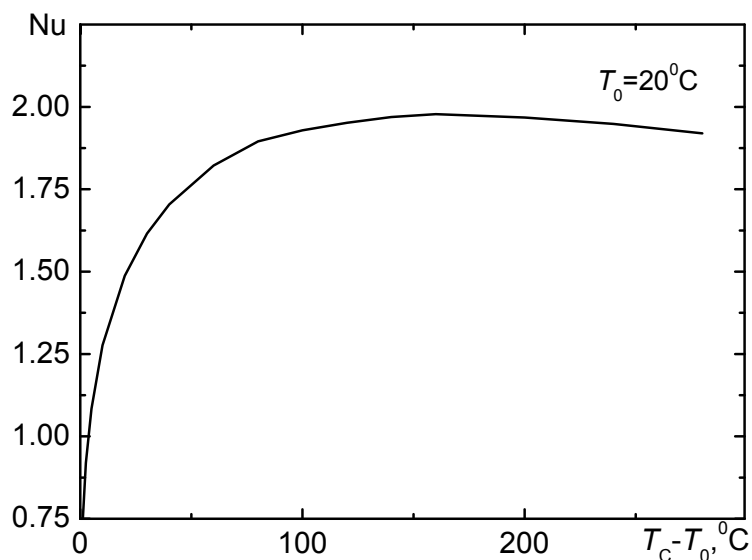


Рисунок 3 – Число Нуссельта для двужильного кабеля ВВГ2х4

Зависимость числа Нуссельта от перепада температур поверхности кабеля и воздуха, которая взята равной $T_0 = 20 \text{ }^\circ C$, дана на рис. 3.

При определении коэффициента теплоотдачи нужно, в соответствии с рекомендациями [6], использовать соотношение

$$\alpha = \frac{Nu_b \lambda_B}{b} . \tag{12}$$

Исходя из сказанного, коэффициент теплообмена кабеля ВВГ2х4 в диапазоне перепадов $\Delta T = T_c - T_0 \leq 280 \text{ }^\circ C$ можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\alpha = 3,24 + 3,54 \cdot [1 - \exp(-\Delta T / 7,1)] + 7,07 \cdot [1 - \exp(-\Delta T / 108)] . \tag{13}$$

Сравним результаты расчетов нагрева двужильного и одножильного кабелей при номинальном токе $I = 44 \text{ A}$. На рис. 4 показана динамика изменения во времени температуры жилы и поверхности оболочки кабеля ВВГ2х4. Видно, что в двужильном кабеле устанавливается стационарная температура жилы (около $95,4 \text{ }^\circ C$), которая значительно превышает стационарную температуру одножильного кабеля (около $65 \text{ }^\circ C$).

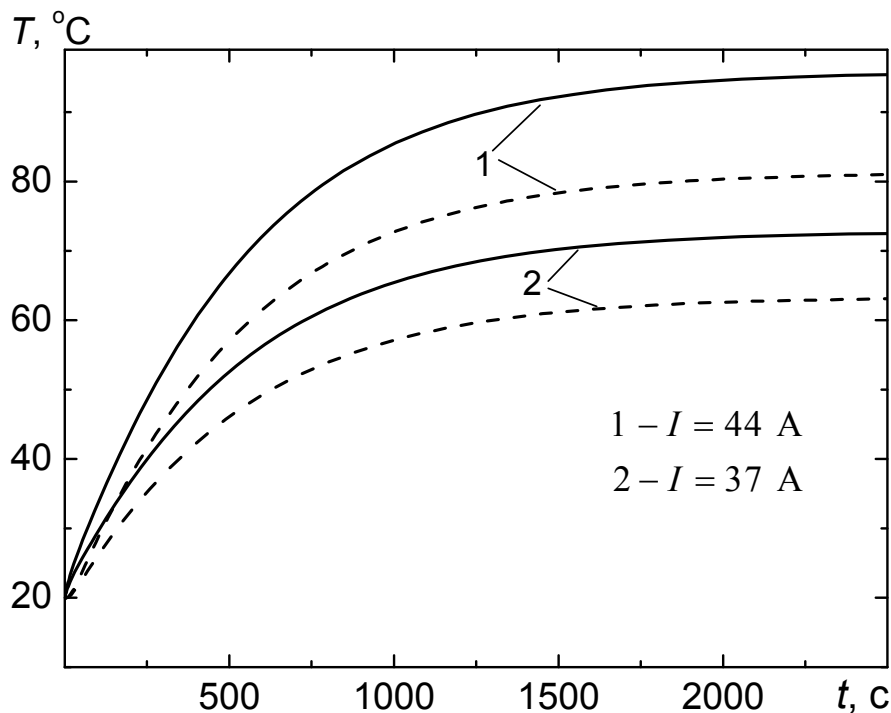


Рисунок 4 – Динамика нагрева проводника и оболочки двужильного кабеля ВВГ2х4

Ясно, что это связано с различием коэффициентов теплоотдачи и разной температурой поверхности кабелей. Однако, по-видимому, главную роль играет различие поверхности теплообмена кабелей с окружающей средой. В одножильном цилиндрическом и двужильном кабелях поверхность теплообмена на один погонный метр длины равна соответствующему периметру оболочки Π

$$\Pi_1 = 2\pi(R_w + \Delta R_{\text{И}} + \Delta R_{\text{Об}}). \tag{14}$$

Поскольку через поверхность АА (рис. 2) двужильного кабеля теплообмен не происходит, периметр кабеля, приходящийся на каждую жилу с током силой 44 А, есть

$$\Pi_2 = \pi(R_w + \Delta R_{\text{И}} + \Delta R_{\text{Об}}) + 2(R_w + \Delta R_{\text{И}}). \tag{15}$$

Для оценки стационарной температуры жилы можно взять приближенное выражение из [1]

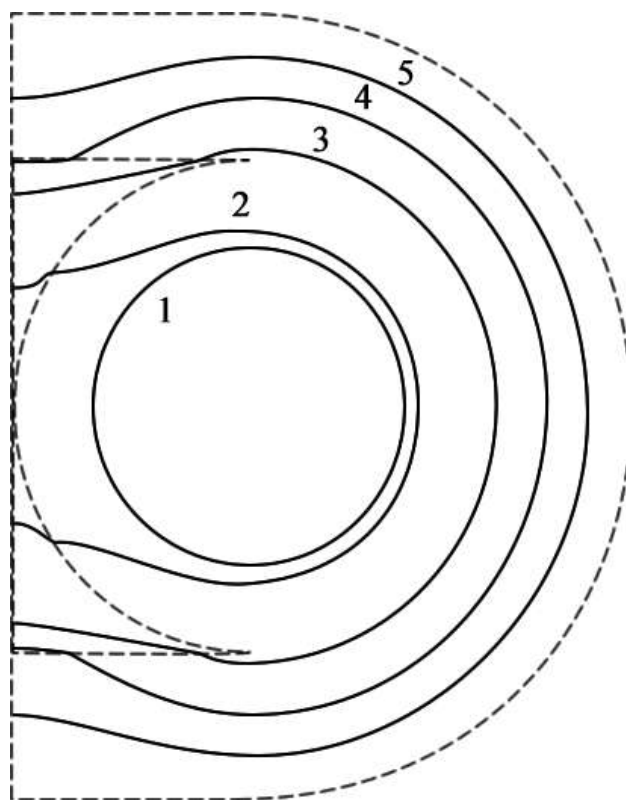
$$T_w \cong \frac{\rho I^2}{S_w \alpha \Pi}. \tag{16}$$

Тогда соотношение стационарных температур проводников с одинаковыми характеристиками в двужильном и одножильном кабелях можно записать как

$$T_2 \cong T_1 \frac{\alpha_1 \Pi_1}{\alpha_2 \Pi_2}. \tag{17}$$

Интересно, что температура жилы в двужильном кабеле, вычисленная по (17), оказы-

вается равной 93 °С, т. е. очень близкой к истинной температуре проводника 95,4 °С, а температура поверхности двужильного кабеля, оцененная по той же формуле (17) через температуру поверхности одножильного цилиндрического кабеля, оказывается равной 81,5 °С.



**Рисунок 5 – Изолинии температуры в кабеле ВВГ2х4 в стационарном режиме при $I = 44$ А :
1 – 95,4; 2 – 94; 3 – 88; 4 – 85; 5 – 83 °С ; температура воздуха $T_0 = 20$ °С**

Если в (16) принять одинаковые значения температур T_w для двух кабелей, то можно оценить какой должен быть ток в жилах двужильного кабеля, чтобы обеспечить тот же нагрев проводника, что и в одножильном кабеле:

$$I_2 \cong I_1 \left(\frac{\alpha_2 \Pi_2}{\alpha_1 \Pi_1} \right)^{1/2}. \quad (18)$$

Полученное отсюда значение тока $I_2 \cong 37$ А. На рис. 4 вторая пара кривых отвечает именно этой величине тока. Как видно, расчет динамики нагрева двужильного кабеля дает более высокие температуры жилы и поверхности изоляции (соответственно $T_w = 72,5$ и 63 °С).

На рис. 5 приведено распределение температуры в сечении кабеля ВВГ2х4 в стационарном состоянии, отвечающем току силой 44 А, причем показана половина сечения кабеля ввиду симметрии картины.

Результаты численного моделирования процесса нагрева двужильного кабеля ВВГ2х4 и их сравнение с экспериментальными данными [7] показано на рис. 6. Сила тока 79,2 и 92,4 А, диаметр жил $2,6 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

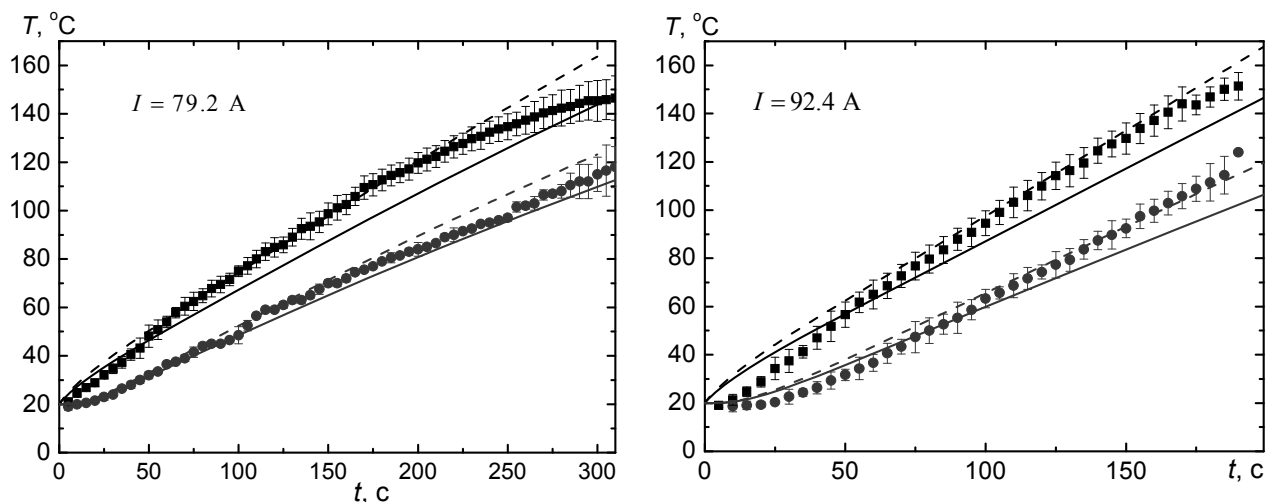


Рисунок 6 – Временной ход температуры кабеля ВВГ2х4 при токах 79,2 и 92,4 А;
 жилы – верхние кривые, поверхность оболочки – нижние,
 сплошные линии – $R_w = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, пунктир – $R_w = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,
 точки – экспериментальные данные

Экспериментальные зависимости получены по трем протоколам испытаний. В каждом протоколе проводились измерения температуры жилы (в трех точках по длине кабеля) и оболочки кабеля. На рис. 6 представлены стандартные отклонения по девяти рядам измерений температуры жилы и трем рядам измерений оболочки кабеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована динамика нагрева электрическим током одножильных и двухжильных изолированных кабелей, охлаждаемых в результате свободно-конвективного теплообмена с окружающим воздухом. Изложены методики и результаты компьютерного моделирования. Разработанная модель позволяет учесть зависимость теплофизических и электрических свойств материала кабеля от температуры, проследить за изменением температуры жилы и изоляции во времени, имеет возможность описания динамики процессов при меняющейся во времени силе тока.

Полученные методом конечных элементов результаты сопоставляются с данными экспериментов, их сравнение показывает хорошее соответствие расчетов имеющимся экспериментальным данным.

Выполненные расчеты стационарных температур, достигаемых в одножильном и двухжильном кабелях, показывают, что достаточно простые расчеты с приемлемой точностью могут использоваться для оценки нагрева кабелей более сложной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аушев, И.Ю. Моделирование стационарного нагрева одиночного изолированного проводника электрическим током / И.Ю. Аушев, Ю.А. Станкевич, К.Л. Степанов // Вестн. Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2012. – № 2 (16). – С. 77-86
2. Аушев, И.Ю. Нагрев изолированного кабеля длительным электрическим током / И.Ю. Аушев, Ю.А. Станкевич, К.Л. Степанов // Пожарная безопасность: теория и практика – сборник научных работ, Львов – 2012 (в печати).
3. Гельфанд, И.М. Метод «прогонки» для решения разностных уравнений. В кн. : Годунов С.К., Рябенький В.С. Введение в теорию разностных схем. М. : Физматгиз, 1962. – 60 с.
4. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия: ГОСТ 16442–80. – Введ. 01.01.82, с изм. и доп. (май 1999). – М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1999. – 23 с.
5. Дворецкий, С.И. Компьютерное моделирование процессов и аппаратов пищевой, био- и химической технологии в среде FlexPDE : Учебное пособие / А.А. Ермаков, О.О. Иванов, Е.И. Акулинин. – Тамбов : Изд-во Тамбовского гос. тех. ун-та, 2006. – 72 с.
6. Мартыненко, О.Г. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин. – Минск, Наука и техника, 1982. – 399 с.
7. Аушев, И.Ю. Выбор аппаратов защиты электропроводок с учетом времятоковых характеристик // Энергетика. – 2009. – № 3. – С. 35–41.