DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.108-118

Н. Н. Елин, В. Б. Бубнов, В. А. Комельков, Д. Б. Самойлов (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России; e-mail: kafppv@mail.ru)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ВОДОПРОВОДОВ В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Трубопроводы наружной прокладки для перекачки воды, в том числе и на нужды пожаротушения, в зимних условиях Крайнего Севера работают в напряжённых термических условиях. При аварийной или плановой остановке подачи жидкости возможно промерзание тепловой изоляции трубопровода, а затем – замерзание находящейся в нём неподвижной воды. С целью повышения достоверности проектирования таких трубопроводов и прогнозирования их тепловых характеристик при аварийных ситуациях разработаны математические модели с учётом фазовых переходов (промерзания или оттаивания) в тепловой изоляции и в жидкости и работы тепловыделяющих элементов.

Ключевые слова: математическая модель, противопожарное водоснабжение, энергетическая эффективность, надёжность, тепловые потери, изоляция, электрообогрев, ячеечная модель, трубопровод, теплоподвод.

При конструктивных и поверочных расчётах наружных трубопроводов противопожарного водоснабжения в районах Крайнего Севера, имеющих надземную прокладку, необходимо учитывать возможность частичного промерзания их теплоизоляции и, следовательно, уменьшение её термического сопротивления. Актуальной задачей является определение времени ликвидации аварий на таких трубопроводах из условия недопущения замерзания в них воды при учёте частичного промерзания тепловой изоляции. Согласно [1], в отключенном участке трубопровода замерзание находящейся в нём воды допускается до 25 %.

В последнее время для повышения энергетической эффективности теплоизолированных трубопроводов стали применять их электрообогрев, который способен в ряде случаев минимизировать негативные последствия процессов, сопровождающих аварийные ситуации [2]. Кабельные системы обогрева имеют ряд преимуществ перед водяными и паровыми: малая материалоёмкость, простота установки и автоматизации, отсутствие коррозии, возможность применения на сложных и разветвлённых сетях трубопроводов.

Ещё в 60-е годы XX века для электрообгрева нефтепроводов в США использовались нагревательные ленты на основе саморегуляции, а в Японии – СКИН-системы электрообогрева [2]. В настоящее время для трубопроводов сравнительно небольшой протяжённости используются резистивные или саморегулирующиеся нагревательные кабели, а при необходимости обогрева трубопроводов протяжённостью более 3000 *м* применяется СКИН-система электрообогрева на основе индукционно-резистивной системы нагрева, которая в настоящее время является приоритетным способом промышленного электрообогрева трубопроводов большой протяжённости.

© Елин Н. Н., Бубнов В. Б., Комельков В. А., Самойлов Д. Б., 2019

Несмотря на то, что системы электрообогрева широко распространены в российской промышленности и известны работы по созданию инженерных методов их расчёта [3, 4], нормативные документы по их проектированию до настоящего времени отсутствуют.

Величина тепловых потерь наружного противопожарного трубопровода зависит в основном от толщины и теплопроводности тепловой изоляции. Чем больше толщина теплоизоляции и меньше её теплопроводность, тем меньше тепловые потери и меньше требуемая мощность системы электрообогрева.

Процесс остывания и последующего прогрева теплоизолированного трубопровода, оборудованного системой электрообогрева, с находящейся в нём жидкостью при наличии фазовых переходов в жидкости и в слое теплоизоляции, представляет собой весьма сложный нестационарный тепловой процесс, а моделирование и расчёт которого – сложную, но актуальную задачу.

Существующие методы расчёта рассматриваемого нестационарного процесса основаны на представлении его как квазистационарного [1] с использованием уравнения теплового баланса, согласно которому сумма теплоты, аккумулированной в заполненном жидкостью трубопроводе в диапазоне от начальной температуры до температуры замерзания, и теплоты, выделяющейся при формировании слоя замёрзшей жидкости объёмом занимающего 25 % объёма трубопровода, равна величине тепловых потерь за расчётный период.

Использование для моделирования данного процесса традиционных подходов, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных, возможно только при допущениях, которые не всегда соответствуют физической картине процесса [5, 6]. Например, фазовые переходы при промерзании и оттаивании влажной тепловой изоляции, наличие внутренних источников теплоты вследствие электрообогрева при его различном конструктивном оформлении и ряд других явлений не позволяют рассчитывать на аналитические решения уравнения теплопроводности, описывающего тепловые процессы в поперечном сечении трубопровода. Поэтому необходимы другие подходы, основанные на численных методах решения.

Одним из наиболее эффективных и успешно применяемых подходов к моделированию подобных процессов является использование ячеечных моделей [7-9].

Разработана нелинейная ячеечная математическая модель сложного процесса теплопроводности в составной кольцевой области с учётом фазовых переходов, изменения теплофизических свойств и действия внутренних источников теплоты, на основе которой предложено описание переходного теплового процесса в сечении трубопровода с подвижной и неподвижной жидкостью, учитывающее кинетику промерзания изоляции и самой жидкости.

На рис. 1 показан объект моделирования – теплоизолированный трубопровод. Толщина металлической стенки равна $R_2 - R_1$, слоя тепловой изоляции $-R_3 - R_2$. Элемент с углом $\Delta \varphi$ при вершине разбит на m_3 ячеек по радиусу. Толщина ячеек постоянна $\Delta r = R_3/m_3$ и имеет средние радиусы $r_j = \Delta r(j - 0,5)$, $j = 1, 2, ..., m_3$.



Рис. 1. Расчётная схема исследуемого объекта

Объём и поверхности взаимодействия с соседними ячейками у всех ячеек различны. Теплофизические параметры свойства и параметры состояния ячеек представлены векторами-столбцами размером $m_3 \times 1$, например, $\lambda = \{\lambda_j\}$ – вектор коэффициентов теплопроводности, ρ – вектор плотностей, c – вектор теплоёмкостей, t – вектор температур, M_i – вектор содержания льда, M_w – вектор содержания влаги в ячейках.

Эволюция векторов состояния, начиная с заданных начальных значений, описывается рекуррентными уравнениями

$$Q^{k+1} = P_Q(Q^k + \Delta Q_e^k + \Delta Q_i^k);$$
(1)

$$t^{k+1} = P_t (t^k + \Delta t_e^k + f(t^k, t_p)),$$
(2)

где Q^k , t^k и Q^{k+1} , t^{k+1} – текущее и последующее через промежуток времени $\Delta \tau$ распределения теплоты и температуры по ячейкам в моменты времени $\tau_k = (k - 1)\Delta \tau$, где k – номер временного перехода, который является целочисленным аналогом времени.

 ΔQ_{e}^{k} и ΔQ_{i}^{k} – векторы притока теплоты от внешних и внутренних источников;

 Δt_e^k – изменение температуры вследствие внешнего теплообмена;

 (t^{k}, t_{p}) – слагаемое, учитывающее замерзание влаги при температуре t_{p} ;

 P_Q , P_t – матрицы переходных вероятностей для теплоты и температуры.

На главной диагонали матрицы P_Q расположены доли теплоты, остающейся в ячейках в течение одного временного перехода, под ними – доли теплоты, переходящей путём теплопроводности вправо, над ними – влево [8]:

$$p_{j-1,j}^{k} = \frac{\lambda_{j-1}^{k}}{c_{j}^{k} \rho_{j}^{k}} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_{j}}\right) \frac{\Delta \tau}{\Delta r^{2}};$$
(3)

$$p_{j+1,j}^{k} = \frac{\lambda_{j}^{k}}{c_{j}^{k}\rho_{j}^{k}} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_{j}}\right) \frac{\Delta \tau}{\Delta r^{2}};$$
(4)

$$p_{j,j}^{k} = 1 - p_{j-1,j}^{k} - p_{j+1,j}^{k},$$
(5)

Вектор изменения температуры в результате внешнего теплообмена Δt_e^k имеет два ненулевых элемента, которые относятся к крайним ячейкам с номерами $m_1 + 1$ (теплоотдача к внутренней стенке трубы от воды) и m_3 (теплоотдача к окружающему воздуху от наружной поверхности изоляции)

$$\Delta t_{e,m_{1}+1}^{k} = \frac{\alpha_{w}R_{1}\Delta\phi(t_{w}^{k} - t_{m_{1}+1}^{k})\Delta\tau}{c_{m_{1}+1}^{k}\rho_{m_{1}+1}^{k}r_{m_{1}+1}\Delta r\Delta\phi};$$
(6)

$$\Delta t_{e,m_3}^k = \frac{\alpha_a R_3 \Delta \varphi (t_a^k - t_{m_3}^k) \Delta \tau}{c_{m_3}^k \rho_{m_3}^k r_{m_3} \Delta r \Delta \varphi},\tag{7}$$

где α_w и α_a – коэффициенты теплоотдачи к стенке трубы от жидкости и к воздуху от наружной поверхности изоляции;

t_{wk} и *t_{ak}* – температуры жидкости и окружающего воздуха.

Фазовые переходы в уравнении (2) описывает функция $f(t^k, t_p)$. Если *j*-я ячейка охлаждается $(t_j^{k+1} < t_j^k)$ и оказывается, что $t_j^{k+1} < t_p$ и $M_{ij}^k < M_{w0j}$ (имевшаяся в *j*-й ячейке влага замёрзла не вся), то в этом случае принимается, что $t_j^{k+1} = t_p$, а теплота $\Delta Q_{pj}^{k} = c_j^k \rho_j^k (t_j^{k+1} - t_j^k) r_j \Delta r \Delta \phi$ идёт на образование льда массой

$$M_{ij}^{k+1} = M_{ij}^{k} + \Delta Q_{pj}^{k} / q_{p}, \qquad (8)$$

где *q*_{*p*} – удельная теплота плавления.

Если на очередном этапе оказывается, что $M_{ij}^{k} < M_{woj}$ (в ячейке замёрзла вся влага), то M_{ij}^{k+1} приравнивается к M_{woj} и считается, что в этой ячейке фазовый переход закончился, а дальнейшее изменение теплоты и температуры происходит в ней исключительно в результате теплопроводности. При нагреве ячейки, содержащей смесь льда и воды, идёт противоположный процесс таяния льда, который описывается теми же зависимостями.

Изменение фазового вещества в ячейках приводит к изменению их теплофизических свойств. В слое тепловой изоляции при этом формируется граница, которая разделяет зоны с капельной и замёрзшей влагой.

Уравнения (1)-(8) с представленными выше дополнительными действиями описывают процесс нестационарной нелинейной теплопроводности в рассматриваемом сечении в полном виде. Термическим сопротивлением самой трубы можно пренебречь, поскольку её теплопроводность значительно больше, чем у тепловой изоляции, а толщина её стенки – намного меньше. На рис. 2 показана эволюция распределения температуры при действии постоянного теплового источника, локализованного в шестой ячейке кольца, при различных значениях его мощности. Подводимая теплота распространяется путём теплопроводности как внутрь, так и наружу сечения, повышая его среднюю температуру и несколько меняя характер её распределения.



Рис. 2. Пример расчёта эволюции распределения температуры при различной тепловой мощности, локализованной в шестой ячейке источника

Для примеров моделирования рассматриваемого процесса выбран трубопровод длиной 8 км со скоростью движения жидкости 0,4 M/c при температуре окружающей среды -40 °C и скорости ветра 3 M/c. Учёт обогрева производится так же, как в модели неподвижного сечения. Если обогрев распределён по всей длине трубопровода, то он действует в течение всех N временных переходов. Если он локализован на определённом отрезке трубопровода, то он включается в те временные переходы, которые соответствуют прохождению этого отрезка.

На рис. 3 показано влияние удельной тепловой мощности обогрева, распределённого по всей длине трубопровода. При отсутствии обогрева температура жидкости на последних 2-х *км* уходит в отрицательную область, что делает трубопровод непригодным для эксплуатации. С ростом удельной тепловой

мощности обогревателя температура на выходе повышается и при ΔQ_e около 20 *Вт/м* покидает критическую зону. Графики продвижения фронта промерзания изоляции полностью соответствуют кривым охлаждения жидкости. На графике (*в*) показана эволюция распределения температуры в изоляции на начальном участке трубы при $\Delta Q_e = 100 \ Bm/m$. На длине около 600 *м* изоляция промерзает на 60 % и дальнейшее продвижение фронта прекращается: термическое сопротивление изоляции перестаёт меняться.

Из рис. 3 следует, что при тепловой мощности источника 10 *Bm/м*, распределённого по всей длине трубы, не удаётся поднять температуру на выходе до нулевого значения.



Рис. 3. Охлаждение воды по длине трубы (*a*), глубина промерзания изоляции (б) и распределение температуры в изоляции на начальном участке трубы (*в*) при $\Delta Q_e = 100 \ Bm/m$ при различной удельной мощности обогрева: $1 - 0 \ Bm/m$; $2 - 10 \ Bm/m$; $3 - 20 \ Bm/m$; $4 - 30 \ Bm/m$; $5 - 40 \ Bm/m$; $6 - 50 \ Bm/m$; $7 - 60 \ Bm/m$; $8 - 100 \ Bm/m$ Рассмотрим, нельзя ли достичь этого, локализуя ту же полную тепловую мощность, которая равна $10.8000/1000 = 80 \ \kappa Bm$, ближе к концу трубы. Результаты этих расчётов показаны на рис. 4, где обогрев последовательно сжимается все ближе к выходному концу трубы. Из графиков следует, что характер распределения тепловой мощности обогрева по длине трубы не влияет на конечную температуру.



Рис. 4. Изменение по длине трубы температуры воды при различной локализации тепловой мощности обогрева, обеспечивающего заданную температуру жидкости на выходе: 1 – ΔQ_e = 24 Bm/м; 2 – 44 Bm/м; 3 – 56 Bm/м; 4 – 79 Bm/м

Рассмотрим задачу в несколько иной постановке. Без обогрева кривая охлаждения при 6 км проходит "критическую точку", где температура теплоносителя достигает 0 °C. Подберём удельную мощность распределённого по всей трубе обогрева, чтобы в конце трубы температура не опустилась ниже нуля. Эта мощность оказывается равной 24 *Bm/м* (кривая 1), а полная мощность обогрева составляет 24.8000/1000 = 192 кВт. Теперь рассмотрим другой вариант: распределим на оставшихся 2-х км тепловой обогрев и подберём его удельную мощность таким образом, чтобы жидкость далее не охлаждалась, то есть не происходило её замерзания, а в конце её температура тоже составляла 4), а полная мощность обогрева составляет 79.2000/1000 = 158 кВm, что на 17,7 % меньше, чем в предыдущем случае. Промежуточные величины зоны обогрева (рис. 4) дают значения полной мощности обогрева между двумя этими значениями. График зависимости полной тепловой мощности, требуемой для поддержания заданной нулевой температуры на выходе, от длины зоны обогрева показан на рис. 5, из которого следует, что наиболее энергетически выгодно размещать обогрев между критической точкой без обогрева и концом трубы. Это справедливо для любой температуры на выходе из трубы, заданной по условиям эксплуатации.



Рис. 5. Влияние длины участка обогрева (от конца трубопровода), обеспечивающего отсутствие отрицательной температуры жидкости на полную мощность обогрева

Очевидно, что температура окружающей среды меняется с течением времени. Предположим, что характерное время изменения внешней температуры много больше времени переходного процесса в трубопроводе. Пусть на выходе трубопровода должна поддерживаться температура не менее 5 °C. В верхней части рис. 6 представлены результаты расчётов снижения по длине трубопровода температуры жидкости при разных температурах окружающей среды. При -20 °C и более требуемое условие выполняется. В случае более низких температур необходимо использование электрообогрева трубопровода. Локализация электрообогрева, его удельная и полная мощность для тех же температур окружающей среды показаны в нижней части рис. 6.



Рис. 6. Изменение температуры воды по длине трубы (вверху) при рационально распределённой тепловой мощности обогрева (внизу), обеспечивающего заданную температуру на выходе при различных температурах окружающей среды

Реализация подобных программ регулирования требует секционирования нагревательных элементов и независимого регулирования мощности в секциях. Естественно, что это может быть выполнено с некоторым приближением, так как невозможно установить регулируемые секции на каждом метре трубы. Решение этой задачи не входит в проблематику данной работы, но разработанная модель является расчётной основой её решения.

Результаты вычислительных экспериментов с разработанной моделью показали, что энергетически оптимальным является распределение теплоподвода между "критической точкой" (местом достижения заданной температуры) и концом трубопровода. Для обогрева трубопровода следует применять отдельные продольные секции с независимым регулированием их тепловой мощности в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Программы регулирования секционного обогрева могут формироваться с помощью разработанной модели процесса.

Заключение

1. Разработана нелинейная ячеечная математическая модель теплопроводности в составной кольцевой области с учётом фазовых переходов, изменения теплофизических свойств и действия внутренних источников теплоты. Выполнено расчётное исследование влияния параметров процесса на характеристики его протекания.

2. Показано, что при заданной суммарной тепловой мощности обогрева трубопровода конечная температура жидкости практически не зависит от распределения этой мощности по длине трубопровода.

3. Установлено, что энергетически оптимальным для поддержания заданной температуры воды на выходе из трубопровода является размещение обогрева между критической точкой без обогрева и концом трубопровода.

4. Показана эффективность применения отдельных продольных секций с независимым регулированием их тепловой мощности в зависимости от изменения температуры окружающей среды.

Литература

1. Тепловая изоляция: справочник / под ред. Г. Ф. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1985. 440 с.

2. Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А. Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой области. Справочная книга. М.: изд-во "Инфра – Инженерия", 2015. 272 с.

3. Дегтярева Е. О. Правила расчёта мощности обогрева трубопроводов (по рекомендациям стандартов МЭК 62086 и 62395) // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2011. № 1. С. 12-15.

4. Дегтярева Е. О. Оптимизация толщины теплоизоляции обогреваемых трубопроводов // Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2012. № 1. С. 42-47.

5. *Кузнецов* Г. В., Половников В. Ю. Математическое моделирование процессов тепловлагопереноса в тепловой изоляции трубопроводов // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 6. С. 37-39.

6. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

7. *Мисбахов Р. Ш., Мизонов В. Е.* Моделирование теплопроводности в составной области с фазовыми переходами // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 4. С. 39-43.

8. *Мизонов В. Е., Елин Н. Н., Попелышко А. В.* Ячеечная модель теплового состояния поперечного сечения теплоизолированного трубопровода // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. Вып. 4. С. 112-115.

9. Мизонов В. Е., Елин Н. Н., Попелышко А. В., Мыльников В. А. Моделирование теплового состояния поперечного сечения трубопровода при промерзании теплоизоляции // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 2. С. 67-70.

Материал поступил в редакцию 8 февраля 2018 г.

Для цитирования: *Елин Н. Н., Бубнов В. Б., Комельков В. А., Самойлов Д. Б.* Использование электрообогрева для повышения надёжности эксплуатации противопожарных водопроводов в районах Крайнего Севера // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 2 (84). – 2019. – С. 108-118. DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.108-118.

N. N. Yelin, V. B. Bubnov, V. A. Komelkov, D. B. Samoylov USAGE OF THE ELECTRICAL HEATING FOR INCREASING THE RELIABILITY OF OPERATION OF FIRE-PREVENTION WATER SUPPLY SYSTEMS IN THE REGION OF THE FAR NORTH

Pipelines of external laying for water pumping including for needs of fire extinguishing, in winter conditions of the Far North operate in intense thermal conditions. Frost penetration in thermal isolation of the pipeline is possible, and then the still water within it may freeze as a consequence at an emergency or planned stop of supply of liquid.

For the purpose of increasing the reliability of designing of pipelines in the systems of external fire-water supply operating at low temperatures and also forecasting of their thermal characteristics at emergencies, researches of a steady and transition thermal state of cross section of the heat-insulated pipeline taking into account phase transitions (frost penetration or thawing) in thermal isolation and in liquids and operation of fuel elements are conducted.

The analysis of the existing methods of calculation of this non-stationary thermal process in a pipeline has shown that they are based on use of the equation of thermal balance. However at the same time change of thermo-physical parameters of a layer of thermal insulation during the considered period, caused by change of the temperature, and, above all at its partial frost penetration were not taken into account. The calculation method based on these assumptions isn't capable to consider change of parameters of the environment which can happen quickly enough in the region of the Far North.

The same tasks also arise at designing and calculation of continuously operating pipelines where the thermal resistance of isolation also depends on ambient temperature and can't be calculated on the basis of one-dimensional balance models.

Creation of mathematical models, methods of calculation and studying of process in the heated pipelines using, as a rule, the electric heating elements is of special interest. Here the impact on a thermal condition of thermal insulation is even more difficult and is investigated insufficiently until today.

The mathematical models allowing predict authentically a thermal condition of the systems of external fire water supply operating at low negative temperatures with regards of the most decisive factors including heating are developed.

Key words: mathematical model, fire water supply, power efficiency, reliability, thermal losses, isolation, electrical heating, cell-like model, pipeline, heat supply.

References

1. *Teplovaya izolyatsiya: spravochnik* [Thermal insulation: A Handbook]. Ed. by G. F. Kuznetsov, Moscow, Stroyizdat Publ., 1985, 440 p.

2. Strupinskiy M. L., Khrenkov N. N., Kuvaldin A. B. *Proyektirovaniye i ekspluatatsiya sistem elektricheskogo obogreva v neftegazovoy oblasti. Spravochnaya kniga* [Design and operation of electric heating systems in the oil and gas industry. Reference book]. Moscow, "Infra – Inzheneriya" Publ., 2015, 272 p.

3. Degtyareva E. O. *Pravila raschota moshchnosti obogreva truboprovodov (po rekomendatsiyam standartov MEK 62086 i 62395)* [Rules for calculating the heating power of pipelines (according to the recommendations of IEC 62086 and 62395)]. *Promyshlennyy elektroobogrev i elektrootopleniye / Industrial heating and electric heating*, 2011, no. 1, pp. 12-15.

4. Degtyareva E. O. Optimization of thermal insulation thickness of heated pipelines. *Promyshlennyy* elektroobogrev i elektrootopleniye / Industrial heating and electric heating, 2012, no. 1, pp. 42-47 (in Russian).

5. Kuznetsov G. V., Polovnikov V. Yu. *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov tep-lovlagoperenosa* v teplovoy izolyatsii truboprovodov [Mathematical modeling of heat and moisture transfer processes in thermal insulation of pipelines]. *Energosberezheniye i vodopodgotovka / Energy Saving and Water Treatment*, 2007, no. 6, pp. 37-39.

6. Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow, Yeditorial URSS Publ., 2003, 784 p.

7. Misbakhov R. Sh., Mizonov V. E. Simulation of heat conduction in a composite domain with phase transformation. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta / Bulletin of Ivanovo State Energy University*, 2015, no. 4, pp. 39-43.

8. Mizonov V. E., Yelin N. N., Popelyshko A. V. Yacheyechnaya model' teplovogo sostoyaniya poperechnogo secheniya teploizolirovannogo truboprovoda [Cellular model of the thermal state of the cross-section of a thermally insulated pipeline]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya / Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology, 2013, vol. 56. no. 4, pp. 112-115.

9. Mizonov V. E., Yelin N. N., Popelyshko A. V., Mylnikov V. A. Heat state simulation of pipeline cross section at frost penetration of heat insulation. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta / Bulletin of Ivanovo State Energy University*, 2013, no. 2, pp. 67-70.

For citation: Yelin N. N., Bubnov V. B., Komelkov V. A., Samoylov D. B. Usage of the electrical heating for increasing the reliability of operation of fire-prevention water supply systems in the region of the Far North. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 2 (84), 2019, pp. 108-118 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.2.84.108-118.

© Yelin N. N., Bubnov V. B., Komelkov V. A., Samoylov D. B., 2019