

Моделирование переходных тепловых процессов в трубопроводе при аварийном останове подачи жидкости

Попельшко А. В., инж.

ФГБУ ВПО “Норильский индустриальный институт”

Елин Н. Н., доктор техн. наук

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет

Мизонов В. Е., доктор техн. наук

Ивановский государственный энергетический университет

Предложена ячеечная математическая модель для описания переходного теплового процесса в сечении теплоизолированного трубопровода с неподвижной жидкостью при снижении температуры окружающей среды до отрицательных значений, вызывающих промерзание теплоизоляции и жидкости. Модель позволяет рассчитать время до допустимой степени замерзания жидкости, а также описать процесс остывания и замерзания при независимом подогреве трубопровода. Приведены результаты расчетного исследования переходных процессов при различных условиях их протекания.

Ключевые слова: длинные трубопроводы для перекачки воды, поперечное сечение, тепловая изоляция, промерзание, подогрев, распределение температуры.

В районах Крайнего Севера в зимний период трубопроводы наружной прокладки для перекачки воды или других жидкостей эксплуатируются в напряженных термических условиях. При аварийном или плановом останове подачи жидкости возможно промерзание тепловой изоляции трубопровода, а затем — замерзание находящейся в нем неподвижной воды. При этом важно знать, каким ресурсом времени располагают ремонтные бригады до частичного или полного замерзания воды и как его можно увеличить.

Существующие методы расчета данного нестационарного теплового процесса в трубопроводе основаны на использовании уравне-

ния теплового баланса: изменение запаса теплоты в жидкости при снижении температуры до температуры замерзания и выделившаяся теплота замерзания приравниваются к тепловой потере в окружающую среду за период останова движения жидкости [1]. При этом допускается замерзание 25 % жидкости в сечении трубопровода. Однако здесь не учитываются изменения теплофизических параметров слоя теплоизоляции в рассматриваемый период, обусловленные изменением ее температуры, а главное — при ее частичном промерзании. Метод расчета, основанный на этих допущениях, не позволяет учитывать изменения параметров окружающей среды,

которые в районах Крайнего Севера могут происходить довольно быстро. Известны попытки рассматривать процессы изменения теплофизических параметров теплоизоляции вследствие насыщения ее влагой как нестационарные [2]. Такой подход, основанный на численном интегрировании дифференциальных уравнений теплопроводности, теплопроводности и фильтрации, с учетом допущений, игнорирующих изменение локальных теплофизических величин, не позволяет получить решение, адекватно описывающее реальную ситуацию.

В настоящей статье предлагается ячеечная модель нестационарной нелинейной теплопроводности в сечении трубопровода. Являясь одним из численных методов решения параболических уравнений в частных производных, эта модель отличается инженерной ясностью составления локальных уравнений теплового баланса и удобством расчетного исследования на базе универсального вычислительного алгоритма. Она успешно использовалась при решении смежных задач тепло-массопереноса [3, 4]. Расчетная схема сечения и его ячеечное представление показаны на рис. 1.

Рассмотрим осесимметричную теплопроводность в составной кольцевой области с нестационарными краевыми условиями 3-го рода и возможными фазовыми переходами внутри колец. В кольцевой области выделен сектор с углом $\Delta\varphi$ при вершине, разбитый по радиусу на m_2 ячеек постоянной радиальной протяженности $\Delta r = R_i/m_2$ со средними радиусами $r_j = \Delta r(j - 0,5)$, $j = 1, 2, \dots, m_2$. Ячейки $1, \dots, m_1$ относятся к жидкости внутри трубы, ячейки $m_1 + 1, \dots, m_2$ — к тепловой изоляции. Собственно труба для простоты исключена из рассмотрения ввиду малой толщины и большой теплопроводности ее стенки. Считается, что в остановившейся в трубе жидкости конвективное движение отсутствует, и радиальная передача теплоты происходит только путем теплопроводности.

Теплофизические свойства ячеек представлены в виде векторов-столбцов размером $m_2 \times 1$, например $\lambda = \{\lambda_j\}$ — вектор коэффициентов теплопроводности, c — вектор теплоемкостей, ρ — вектор плотностей и т. д. Аналогично представлены параметры теплофизического состояния ячеек: Q — вектор теплоты в ячейках; t — вектор температур; M_w — вектор содержания влаги в ячейках; M_i — вектор содержания льда. Состояние процесса наблюдается через дискретные проме-

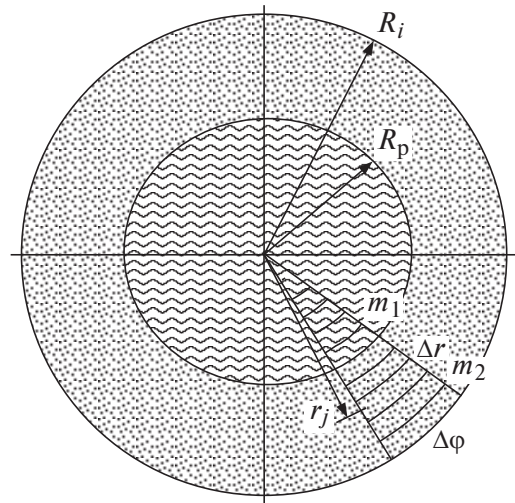


Рис. 1. Расчетная схема и ячеечная модель поперечного сечения трубопровода

жутки времени $\Delta\tau$ в моменты времени $\tau_k = (k - 1)\Delta\tau$, где k — номер временного перехода, являющийся целочисленным аналогом времени. Векторы теплофизических свойств не могут быть заданы заранее, поскольку зависят от положения фронта промерзания. Так, вектор коэффициентов теплопроводности строится из четырех их значений: для влажной теплоизоляции, промерзшей теплоизоляции, воды, замерзшей воды (льда). То же самое относится к другим векторам теплофизических свойств.

Основным оператором модели служит матрица теплопроводности P , которая является трехдиагональной матрицей размером $m_2 \times m_2$ и описывает передачу теплоты между ячейками в полностью теплоизолированном круге радиусом R_i . В [3] описаны правила ее построения для линейной цепи ячеек со скачком свойств, а в [4] — для радиальной цепи ячеек с постоянными свойствами. Объединяя оба правила, получим следующие выражения для элементов этой матрицы:

доля теплоты, переносимой в течение $\Delta\tau$ из ячейки j в предыдущую ячейку

$$p_{j-1,j}^k = \frac{\lambda_{j-1}^k}{c_j^k \rho_j^k} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_j} \right) \frac{\Delta\tau}{\Delta r^2}; \quad (1)$$

доля теплоты, переносимой в течение $\Delta\tau$ из ячейки j в последующую ячейку

$$p_{j+1,j}^k = \frac{\lambda_{j+1}^k}{c_j^k \rho_j^k} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_j} \right) \frac{\Delta\tau}{\Delta r^2}; \quad (2)$$

доля теплоты, остающейся в течение Δt в ячейке j

$$p_{j,j}^k = 1 - p_{j-1,j}^k - p_{j+1,j}^k. \quad (3)$$

Последнее выражение вытекает из условия нормировки матрицы P по столбцам. Все остальные элементы матрицы равны нулю.

Помимо чистой теплопроводности в сечении протекают другие тепловые процессы, которые описываются векторами источников. Вектор теплообмена с окружающей средой ΔQ_e^k содержит единственный ненулевой элемент для внешней ячейки цепи:

$$\Delta Q_{em_2}^k = \alpha (t_a^k - t_{m_2}^k) R_i \Delta \varphi \Delta t, \quad (4)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от периферии теплоизоляции к окружающей среде с переменной в общем случае температурой $t_{m_2}^k$.

Другой вектор тепловых источников ΔQ_i^k связан с тепловыделением в ячейках, обусловленным их подогревом (например, электрическим).

Тепловые процессы, связанные с фазовыми переходами, учитываются следующим образом. На каждом временном переходе температура ячейки сравнивается с температурой фазового перехода t_{me} — замерзания или оттаивания. Если происходит охлаждение j -й ячейки, т.е. $t_j^{k+1} < t_j^k$, и оказывается, что $t_j^{k+1} < t_{me}$ и $M_{ij}^k < M_{w_{0j}}$ (замерзла не вся имевшаяся в j -й ячейке жидкость), то принимается $t_j^{k+1} = t_{me}$, а теплота $\Delta Q_{mej}^k = c_j^k \rho_j^k (t_j^{k+1} - t_j^k) r_j \Delta r \Delta \varphi$ идет на формирование твердой фазы (льда), масса которой в конце перехода

$$M_{ij}^{k+1} = M_{ij}^k + \Delta Q_{mej}^k / q_{me}, \quad (5)$$

где q_{me} — удельная теплота замерзания влаги.

Если окажется, что после очередного перехода $M_{ij}^k > M_{w_{0j}}$ (замерзла вся жидкость), то M_{ij}^{k+1} приравнивается к $M_{w_{0j}}$, и фазовый переход в этой ячейке заканчивается, а дальнейшая эволюция теплоты и температуры в ней контролируется только матрицей теплопроводности. При нагреве ячейки, содержащей полностью или частично твердую фазу, протекает противоположный процесс таяния льда, контролируемый в модели вышеуказанными зависимостями.

При изменении фазового состояния влаги в ячейках их теплофизические свойства изменяются, а в модели появляется окружность переменного радиуса, разделяющая зоны с замерзшей и капельной жидкостью. Поэтому векторы теплофизических свойств проверяются и корректируются на каждом временном переходе.

Таким образом, эволюция теплового состояния сечения описывается рекуррентным матричным равенством

$$Q^{k+1} = P(Q^k + \Delta Q_e^k + \Delta Q_i^k + \Delta Q_{me}^k), \quad (6)$$

являющимся полным решением поставленной задачи. Переход от теплоты к температуре осуществляется по формуле

$$t^k = Q^k ./ c ./ \rho ./ r ./ \Delta r ./ \Delta \varphi, \quad (7)$$

где $./$ — оператор, обозначающий поэлементное деление векторов.

Рассмотрим несколько примеров приложения разработанной модели к описанию тепловых процессов в сечении трубопровода. В качестве объекта моделирования выбран трубопровод для воды диаметром 100 мм со слоем изоляции 50 мм, содержащей 0,1 кг/кг распределенной влаги. Первоначально трубопровод находится в тепловом равновесии с окружающей средой при температуре 1 °С. Чтобы нагляднее наблюдать переходные процессы, в качестве тестового воздействия выбрано одномоментное понижение температуры окружающей среды до -30 °С.

Кинетика процесса промерзания видна из рис. 2, где показано движение фронта промерзания к оси трубы при разных значениях коэффициента внешней теплоотдачи, который может изменяться весьма существенно в зависимости от скорости и направления ветра. Сначала промерзает влага в теплоизоляции, что меняет ее термическое сопротивление, а затем начинает замерзать жидкость в трубе. Довольно часто допустимым считают промерзание 25 % сечения трубопровода [1], что соответствует радиусу фронта промерзания $r_f = 43$ мм (на рис. 2 показан штрихпунктирной линией). При изменении коэффициента теплоотдачи с 5 до 20 Вт/(м·К) время достижения фронтом промерзания этого радиуса уменьшается с 5,1 до 3,2 ч, т.е. весьма существенно.

Одним из перспективных путей управления тепловым состоянием трубопроводов является подогрев изоляции, например, электрическим током. Тепловыделение от специальных ис-

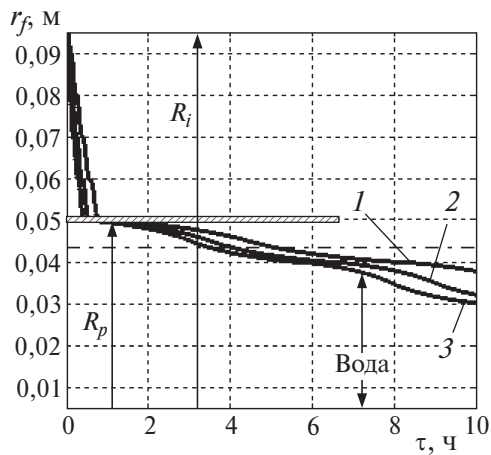


Рис. 2. Графики продвижения фронта заморзания при различных коэффициентах теплоотдачи окружающей среде:

$l \div 3 - \alpha_e = 5, 10, 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

точников предусмотрено в модели слагаемым ΔQ_i^k в равенстве (6). Рассмотрим простейший случай, когда тепловыделяющий элемент размещен непосредственно на поверхности трубы, т. е. выделяемая им теплота попадает в ячейку с номером $m_1 + 1$ — в первую ячейку, принадлежащую теплоизоляции. На рис. 3 показано продвижение фронта промерзания при различной тепловой мощности N_e обогревающего источника на единицу длины трубопровода. При отсутствии тепловыделения вода замораживает полностью за время около 20 ч. С ростом тепловой мощности время увеличивается (что одновременно приводит к отступлению фронта заморзания влаги в теплоизоляции), а при ее значении 300 Вт/м вода может поддерживаться при нулевой температуре неограниченно долго.

Приведенные примеры свидетельствуют о работоспособности модели и возможности

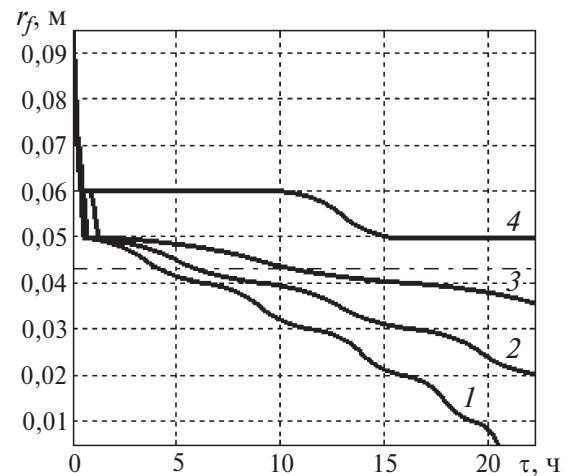


Рис. 3. Графики продвижения фронта заморзания при различной тепловой мощности обогрева трубопровода:

$l \div 4 - N_e = 0, 95, 190, 300 \text{ Вт}/\text{м}$

решения с ее помощью задач, которые нельзя решить с помощью моделей с интегральным тепловым балансом.

Список литературы

1. **Тепловая изоляция** / Под ред. Г. Ф. Кузнецова. — М.: Стройиздат, 1976.
2. **Кузнецов Г. В., Половников В. Ю.** Математическое моделирование процессов теплогапереноса в тепловой изоляции трубопроводов. — Энергосбережение и водоподготовка, 2007, № 6.
3. **Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V.** Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. — Powder Technology, 157 (2005).
4. **Ячеечная модель нелинейной теплопередачи через многослойную стенку** / С. В. Федосов, В. Е. Мизонов, Н. Р. Порошин, Н. Н. Елин. — Строительство и реконструкция, 2011, № 6 (38).

yeline54@mail.ru