© Е.Н. Лелеева, 2006

УДК 622.33:532.584.004.3

Е.Н. Лелеева

ОЛЕДЕНЕНИЕ УГЛЕПРОВОДА, ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННУЮ ВОДОУГОЛЬНУЮ СУСПЕНЗИЮ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Использование угля в виде водоугольной суспензии показало техническую и экономическую выгодность. В 1988 году был открыт магистральный углепровод Белово-Новосибирск доставляющий уголь на ТЭЦ-5 города Новосибирска. Суспензия без обезвоживания подавалась в топку котла на сжигание.

Применявшаяся при этом технология сталкивается с трудностями транспортирования в зимний период, так как водоугольная суспензия замерзает при нуле градусов. Подземная прокладка трубы не гарантирует незамерзаемости, так как трасса рас-положена в зоне вечной мерзлоты. Кроме того, заглубление трубы на очень большие глубины приводит к трудностям технического обслуживания трубопровода.

В данной статье производится расчет температурного и гидродинамического режима работы углепровода и перекачивающих насосов. Опыты показывают, что лед образуется на внутренней поверхности стенки трубы трубопровода. При пуске подземного трубопровода, окруженного грунтами с отрицательной температурой, в начальный период возникает корка льда независимо от температуры жидкости, поступающей в трубопровод.

Сколь высока бы не была эта температура, отток тепла от жидкости в стенку, и от стенки в окружающий грунт, настолько интенсивен, что пристеночные слои жидкости замерзают. Со временем толщина корки льда увеличивается, и температура мерзлого грунта окружающего трубу, также увеличивается. Это приводит к снижению оттока тепла от трубы в окружающий грунт, и через некоторое время корка льда начинает уменьшаться по толщине.

При наличии корки льда работа насосов затрудняется, так как уменьшающаяся площадь поперечного сечения трубы приводит к повышенному сопротивлению. Рабочая точка системы насос-трубопровод перемещается в зону уменьшенного объема, расхода и увеличивается давление перекачки.

Через некоторое время после пуска возможны три ситуации:

1. Корка льда полностью растает, и трубопровод освобождается ото льда.
2. Свободное сечение трубы с коркой льда становится столь малым, что насос не дает необходимо для перекачивания давления, объемный расход жидкости падает, и транспортирование жидкости прекращается.
3. Возникшее на стенках оледенение приводит к установлению равновесия в тепловых потоках, подходящих от жидкости к поверхности льда и уходящих в окружающий грунт.

В третьем случае реализуется длительная эксплуатация трубопровода с оледенением внутренней поверхности стенок. Этот режим считается допустимым, если превышение потерь давления

в трубопроводе составляет не более 15 % от падения давления в трубе без оледенения. Этот режим не следует рекомендовать для эксплуатации без крайней на то необходимости.

Расчет корки льда производится на основании решения температурной задачи по определению поля температур в движущейся жидкости. Этой задаче посвящены монографии [1], [2].

Ниже представлено решение задачи Шухова по распределению температуры жидкости вдоль трубопровода для случая меняющейся линейно по длине температуры окружающего грунта.

Рассмотрим подземный трубопровод, по которому перекачивается ВУС. Тогда напишем уравнение теплового баланса:

$$Q\rho cT = -dx2\pi r\alpha\left(T - T_{гр}(x)\right) + \\ +Q\rho c\left(T + dT\right) \qquad (1)$$

где r - радиус трубы; $Q = u_{ср}\pi r^2$ - объемный расход; c - теплоемкость единицы массы жидкости; $T_{гр}$ – температура окружающего грунта, меняющаяся вдоль трассы; x – координата по длине; α – коэффициент теплообмена трубы с окружающей средой; ρ - плотность жидкости; T – температура жидкости.

Перенося последний член уравнения из правой части в левую, получим

$$\left(dT\right)\rho cQ = -2\pi r\alpha\left(T - T_{гр}(x)\right)dx$$

или

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-2\pi r\alpha}{\rho cQ}\left(T - T_{гр}(x)\right) \qquad (2)$$

Знак минус при коэффициентах в правой части равенства (2) означает охлаждение первоначально теплой жидкости, окружающими холодными грунтами.

Обозначим величину

$$\frac{2\pi r\alpha}{\rho cQ} = K$$

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{dT}{dx} = -K\left(T - T_{гр}(x)\right) \qquad (3)$$

Для решения задачи надо иметь начальное значение температуры жидкости $T_{ж.нач}$ при $x = 0$.

Пусть теперь температура окружающего холодного грунта меняется линейно вдоль координаты x, например грунт нагревается.

$$T_{гр} = T_{гр.нач} + вx. \qquad (4)$$

Тогда уравнение (3) примет вид:

$$\frac{dT}{dx} = K\left(T - T_{гр.нач}. - вx\right). \qquad (5)$$

Введем теперь безразмерную температуру

$$\theta = \frac{T - T_{гр.нач}}{T_{жид} - T_{гр.нач}} \qquad (6)$$

ее дифференциал

$$d\theta = \frac{dT}{T_{ж.нач} - T_{гр.нач}}, \text{ то есть}$$

$$dT = \left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right)d\theta.$$

Подставив это в уравнение (5), получим

$$\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right)\frac{d\theta}{dx} = \left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right)K\theta - Kвx$$

или

$$\frac{d\theta}{dx} = K\theta - \frac{Kвx}{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right)}.$$

Введем новую переменную величину

$$y = \frac{вx}{T_{ж.нач} - T_{гр.нач}}$$

$$dy = \frac{вdx}{T_{ж.нач} - T_{гр.нач}} \text{ или}$$

$$dx = \frac{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) dy}{в}$$

Тогда получим

$$\frac{d\theta в}{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) dy} = K\left(\theta - y\right)$$

или

$$\frac{d\theta}{dy} = \frac{K\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right)\left(\theta - y\right)}{в} \qquad (7)$$

Чтобы решить это уравнение его надо привести к виду $\frac{dz}{dy} = K_1\left(z - y\right)$, которое имеет решение [3]

$$z = y + \frac{1}{K_1} + c\, e^{K_1 y}, \qquad (8)$$

где c определяется из начального условия. Введем обозначения $z = \theta$ и $K_1 = \left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right)\frac{K}{в}$.

Тогда $K_1 = -\frac{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha}{\rho c Q в}$.

Теперь получим

$$\theta = y - \frac{cQв\rho}{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha} + ce^{-\frac{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha y}{\rho c Q в}} \qquad (9)$$

Обратим внимание на начальное условие $T = T_{ж.нач}$ при $x = 0$.

Так как $\theta = \frac{T - T_{гр.нач}}{T_{ж.нач} - T_{гр.нач}}$, то при начальных условиях переменные будут иметь значения $x = 0, y = 0$ $\theta = 1$ и, следовательно, $z = 1$. Теперь имеем $1 = \frac{1}{K_1} + c$ или $c = 1 - \frac{1}{K_1}$. Выражение (9) примет вид:

$$\theta = y - \frac{cQв\rho}{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha} + \left(1 + \frac{cQв\rho}{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha}\right) e^{-\frac{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha y}{\rho c Q в}} \qquad (10)$$

Обозначим

$$q = -\frac{cQв\rho}{\left(T_{ж.нач} - T_{гр.нач}\right) 2\pi r\alpha}. \qquad (11)$$

Тогда соотношение (10) примет вид:

$$\theta = y - q + \left(1 + q\right) e^{-\frac{y}{q}}. \qquad (12)$$

Теперь мы можем построить сеть графиков $\theta = \theta\left(q\right)$, зависящих только от одного параметра y. Пользуясь ими можно решать задачу с многократными участками линейного изменения температуры окружающей среды с различными скоростями ее изменения.

Безразмерная переменная y имеет простой и ясный физический смысл: она является долей изменения температуры окружающей среды от разности температур жидкости и окружающей среды в начале рассматриваемого участка с данным значением $в$.

Вычислим, как изменяется температура в трубопроводе при линейном изменении температуры окружающей среды.

Возьмем $T_{гр.нач} = 5^{\circ}C$, при этом температура линейно изменяется вдоль координаты X (шаг $\Delta\ x = 1000м$).

Из уравнения $T_{гр} = T_{гр.нач} + вx$ мы вычислим величину $в$. Она рассчитывается по формуле:

$$в = (T_{гр} - T_{гр.нач}) / \ x.$$

Коэффициент q вычисляется по формуле (11):

Теперь из зависимости (6) можно вычислить $T_{жид}$:

$$T_{жид} = T_{гр.нач} + \theta\left(T_{жид.нач} - T_{гр.нач}\right).$$

В расчетах приняты r - радиус трубы, равный 0,25 м; шаг счета вдоль координаты $\Delta x = 1000 м$. Профиль изменения температуры грунта вдоль длины трубопровода выбран монотонно возрастающим. Первоначальная температура окружающей среды равна $T_{гр} = 5^{\circ}C$ и далее она возрастает с каждым шагом на 1 ºС. Исходная температура ВУС $T_0 = 26^{\circ}C$.

Коэффициент теплообмена трубы с окружающей средой α вычислен по формуле Власова – Форхгеймера и равен 0,9.

Были сделаны вычисления температуры жидкости при постоянной температуре окружающей среды; при линейном изменении температуры со скоростью $\frac{\Delta T}{\Delta X} = 1\frac{град}{км}$ для различных значений расхода жидкости от $0,0002$ до $0,9\frac{м^3}{с}$.

В начальном сечении температура ВУС превышает температуру грунта и жидкость, следуя по трубопроводу, охлаждается. После того, как температура жидкости и грунта сравняются и грунт будет становится теплее жидкости температура жидкости будет несколько повышаться.

Обнаружено, что имеется область однозначной зависимости объемного расхода от температуры жидкости в текущей точке трассы, однако, обнаружена также неоднозначность связи объемного расхода с температурой жидкости в трубопроводе.

Рассматривалась так же задача изменения температура жидкости по длине трубопровода при немонотонном изменении температуры грунта. Для этого были сделаны расчеты при изменении температуры грунта на $1^{\circ}C$, $3^{\circ}C$ сначала при ее возрастании, а затем при убывании, значения расходов были приняты такими же как и в предыдущих расчетах.

Получены результаты расчета, по которым видно, что температура жидкости по длине трубы убывает, за исключением небольших расходов, когда наблюдается уменьшение температуры, затем ее подъем, а затем снова убывание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондратьев А.С., Овсянников В.М. и др.* Транспортирование водоугольных суспензий гидродинамика и температурный режим М. Недра, 1988.-213 с.

2. *Дубина М.М., Красовицкий Б.А.* Теплообмен и механика взаимодействия трубопроводов и скважин с грунтами. – 1983.

3. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976.

Коротко об авторах

Лелеева Екатерина Николаевна – старший преподаватель кафедры гидравлики и гидравлических машин, Московский государственный открытый университет.