

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ ПО ДЛИНЕ ТРУБОПРОВОДА В РЕЖИМЕ ЗАПОЛНЕНИЯ

УДК: 622.692.
23

TEMPERATURE CHANGE OF HEATED LIQUID ALONG PIPELINE IN THE
FILLING MODE

Галиуллин М. М., Валеев А. Р.,
Баязитов М. И.,
Репин В. В., Аносова Е. П.
ФГБОУ ВПО «Уфимский
государственный нефтяной
технический университет», г. Уфа,
Российская Федерация

M. M. Galiullin, A. R. Valeev, M. I.
Bayazitov, V. V. Repin,
E. P. Anosova
FSBEI HPE «Ufa State Petroleum
Technological University»,
Ufa, the Russian Federation

В работе рассмотрен температурный режим заполняемого нагретой жидкостью подземного неизолированного трубопровода. Математическая постановка задачи включает уравнения в частных производных, описывающие изменение температуры в потоке жидкости и в окружающей трубопровод среде. Аналитическое решение уравнений было проведено методами операционного исчисления. Получена зависимость температуры заполняющей трубопровод жидкости от расстояния с пункта закачки, промежутка времени с момента начала заполнения, параметров трубопровода, окружающего грунта и самой жидкости. Отличие данного решения от ряда других заключается, в частности, в том, что при выводе формулы не использовался коэффициент теплопередачи от жидкости в окружающую среду. Этот коэффициент значительно меняется в процессе прогрева грунта, зависит от ряда факторов, которые не могут быть полностью учтены и, вследствие этого, вносит дополнительную погрешность в формулы, учитывающие его.

Для оценки достоверности решения было сделано сравнение с результатами описанных в литературе исследований. В первой из рассмотренных работ представлены результаты замеров температуры жидкости при заполнении участка подземного нефтепровода Узень – Гурьев. Рассчитанная по формуле кривая достаточно хорошо описывает характер распределения экспериментальных точек. Величина относительного среднеквадратического отклонения составляет 6,7%. Также было проведено сравнение с результатами численного моделирования процесса заполнения нефтепровода диаметром 0,8 м нагретой нефтью. Расхождение результатов составляет десятые доли градуса. Полученные расчетные зависимости могут быть использованы для оценки вариантов безопасного заполнения и вывода «горячего» трубопровода на стационарный режим работы.

In this paper we consider the temperature conditions to be filled hot uninsulated underground pipe fluid. The mathematical formulation of the problem includes partial differential equations describing the temperature change in the fluid flow in a pipeline environment. The analytical solution of equations was carried out by methods of operational calculus. The dependence of the fill fluid piping temperature on the distance from the injection point, time interval from the start of filling the pipeline parameter, the surrounding soil and the liquid itself this solution unlike other is, in particular, that the derivation of unused heat transfer coefficient of the fluid into the environment. This ratio varies greatly in the soil warms up, depends on a number of factors that can not be fully accounted for and, therefore, introduces additional error in the formula, considering it.

To assess the reliability of solutions comparison was made with the results of the studies described in the literature. In the first of those surveyed work presents the results of measurements of the temperature of the liquid during filling of the underground section of the oil pipeline Uzen - Guriev. Calculated by the formula curve fairly well describes the nature of the distribution of the experimental points. The relative standard deviation is 6.7%. It was also compared with the results of numerical modeling of the process of filling the pipeline with a diameter of 0.8 m heated by oil. The discrepancy between the results amounts to a few tenths of a degree. The calculated dependencies can be used to assess the options for safe filling and withdrawal of «hot» pipeline on steady operation.

Ключевые слова: подземный трубопровод, нагретая жидкость, нефть, заполнение, остывание, температура, математическая формула, коэффициент теплопередачи.

Key words: underground pipeline, heated liquid, oil, filling, cooling, temperature, mathematical formula, heat transfer coefficient.

Пусковой режим является наиболее сложным в эксплуатации трубопроводов, перекачивающих подогретые жидкости, такие как вязкие и высокозастиывающие нефти и нефтепродукты. Технология проведения пусковой операции основывается на

прогнозных расчетах режимов заполнения трубопровода и его выхода на стационарный режим. Одной из основных проблем является оценка тепловых потерь при пуске, величина которых значительно выше величины тепловых потерь трубопровода в стационарном режиме. Вопросы перекачки нефти и нефтепродуктов с предварительным подогревом рассмотрены в работах ряда авторов [1-6]. Получены аналитические решения, позволяющие определить температуру жидкости в режимах заполнения и перехода к стационарному состоянию при пуске неизолированных и теплоизолированных трубопроводов. Однако, эти решения

включают коэффициент теплопередачи от жидкости в окружающую среду, который в процессе прогрева системы трубопровод – грунт существенно изменяется, причем в начальный период прогрева его величина в несколько раз превышает значение, достигаемое при выходе на стационарный режим [1].

Характер этих изменений невозможно в полной мере предусмотреть и описать аналитически, поскольку они связаны не только с параметрами трубопровода и перекачиваемой жидкости, но и, в частности, с тем, как на различных участках прокладки трубопровода меняются теплофизические параметры грунта по мере его прогрева с учетом суточных колебаний температуры воздуха. Это относится и к численным методам расчета. Использование стандартных программных комплексов известных фирм не гарантирует безупречное соответствие реальным данным даже при анализе стационарных режимов работы «горячих» трубопроводов [7]. Предложенное ниже решение задачи проведено без использования коэффициента теплопередачи.

Рассмотрим процесс охлаждения заполняющей подземный трубопровод нагретой жидкости [8]. Считаем режим течения жидкости турбулентным. Пусть температура трубопровода и окружающего его грунта T_0 , т.е. трубопровод предварительно не прогревался. В начальный момент времени в трубопровод начинает поступать жидкость при температуре T_H , большей, чем температура T_0 . Требуется найти, как будет меняться температура жидкости в процессе заполнения трубопровода. Полагаем, что жидкость несжимаема, ее температура застывания выше температуры грунта T_0 , скорость закачки постоянна, не происходит перемешивания в продольном направлении, между следующими друг за другом порциями жидкости.

Известно, что на начальном этапе прогрева влияние поверхности грунта незначительно и им можно пренебречь. Поэтому рассматриваем осесимметричную задачу. Считаем также, что контактное сопротивление между внешней поверхностью трубы и грунтом отсутствует. Ввиду незначительной толщины стенки трубы пренебрегаем, на этом этапе решения задачи, разницей между теплофизическими характеристиками грунта и металла, т.е. полагаем, что жидкость граничит с грунтом. Математическая постановка задачи в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

$$w \cdot \frac{\partial T_{жс}}{\partial z} + \frac{\partial T_{жс}}{\partial t} = - \frac{2 \cdot q_{II}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot R_0}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_{ГР}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{ГР}}{\partial R} = \frac{1}{a_{ГР}} \frac{\partial T_{ГР}}{\partial t}, \quad R \geq R_0; \quad (2)$$

$$T_{ГР}|_{t=0} = T_0; \quad (3)$$

$$T_{ГР}|_{R=R_0} = T_{жс}; \quad (4)$$

$$T_{ГР}|_{R \rightarrow \infty} = T_0; \quad (5)$$

$$T_{жс}|_{z=0} = T_H; \quad (6)$$

где $T_{жс}$ – температура (К) кругового слоя жидкости на расстоянии z (м) от места закачки в момент времени t (с), $T_{ГР}$ – температура (К) грунта на расстоянии R (м) от оси трубы ($R \geq R_0$) в момент времени t , w – скорость течения жидкости (м/с), q_{II} – плотность теплового потока от трубопровода в грунт (Вт/м²), $c_{жс}$ – теплоемкость жидкости (Дж/кг·К), $\rho_{жс}$ – плотность жидкости (кг/м³), $a_{ГР}$ – коэффициент температуропроводности грунта (м²/с), R_0 – внутренний радиус трубы (м).

Для решения используем преобразование Лапласа. В пространстве изображений вместо (1) – (6) получим:

$$w \cdot \frac{\partial \overline{T_{жс}}}{\partial z} + s \overline{T_{жс}} = - \frac{2 \overline{q_{II}}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot R_0}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \overline{T_{ГР}}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \overline{T_{ГР}}}{\partial R} = \frac{s}{a_{ГР}} \cdot \overline{T_{ГР}}; \quad (8)$$

$$\overline{T_{ГР}}|_{t=0} = \overline{T_0}; \quad (9)$$

$$\overline{T_{ГР}}|_{R=R_0} = \overline{T_{жс}}; \quad (10)$$

$$\overline{T_{ГР}}|_{R \rightarrow \infty} = \overline{T_0}; \quad (11)$$

$$\overline{T_{жс}}|_{z=0} = \overline{T_H}. \quad (12)$$

Решение дифференциального уравнения (8) ищем в виде:

$$\overline{T_{ГР}} = B_0 \cdot K_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R \right), \quad (13)$$

где B_0 – некоторая постоянная; $K_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R \right)$ – модифицированная функция Бесселя мнимого аргумента нулевого порядка; s – параметр преобразования Лапласа, $\frac{1}{c}$.

С учетом граничного условия (10), имеем:

$$\overline{T_{ГР}} = \overline{T_{жс}} \cdot \frac{K_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R \right)}{K_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R_0 \right)}. \quad (14)$$

Полученная формула описывает изменение температурного режима грунта в пространстве изображений. Плотность теплового потока от трубопровода в грунт находится по формуле:

$$\bar{q}_H = -\lambda_{ГР} \left(\frac{\partial \bar{T}_{ГР}}{\partial R} \right)_{R=R_0} \quad (15)$$

Подставляя (14) в (15) и дифференцируя, имеем

$$\bar{q}_H = \bar{T}_{жс} \cdot \lambda_{ГР} \frac{K_1 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R_0 \right)}{K_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R_0 \right)} \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}}, \quad (16)$$

где $K_1 \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R_0 \right)$ – модифицированная функция Бесселя мнимого аргумента первого порядка, $\lambda_{ГР}$ – коэффициент теплопроводности грунта (Вт/м·К).

Используем разложение функций Бесселя для больших значений аргументов (что соответствует малым временам):

$$K_0(u) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \cdot e^{-\sqrt{u}} \cdot \left(1 - \frac{1}{8\sqrt{u}} \right), \quad (17)$$

$$K_1(u) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \cdot e^{-\sqrt{u}} \cdot \left(1 + \frac{3}{8\sqrt{u}} \right), \quad (18)$$

где $u = \sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \cdot R_0$.

Подставляя (17) и (18) в (16), получим:

$$\bar{q}_H = \bar{T}_{жс} \cdot \lambda_{ГР} \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} + \frac{1}{2R_0} \right). \quad (19)$$

При этом предполагали, что $8R_0 \sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \gg 1$.

Подставляя в (7) выражение для \bar{q}_H из (19), получим

$$\frac{\partial \bar{T}_{жс}}{\partial z} + \bar{T}_{жс} \left[\frac{s}{w} + \frac{2\lambda_{ГР}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} R_0 w} \cdot \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} + \frac{1}{2R_0} \right) \right] = 0. \quad (20)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$\bar{T}_{жс} = B_1 \exp \left[-\frac{s \cdot z}{w} - \frac{2\lambda_{ГР} \cdot z}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} R_0 w} \cdot \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} + \frac{1}{2R_0} \right) \right] + B_2. \quad (21)$$

Определяя постоянные B_1 и B_2 с помощью крайних и начальных условий, получим

$$\bar{T}_{жс} = (\bar{T}_H - \bar{T}_0) \times \exp \left[-\frac{s \cdot z}{w} - \frac{2\lambda_{ГР} \cdot z}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} R_0 w} \cdot \left(\sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} + \frac{1}{2R_0} \right) \right] + \bar{T}_0$$

или

$$\bar{T}_{жс} = (\bar{T}_H - \bar{T}_0) \cdot \exp \left(-\frac{s z}{w} \right) \cdot \exp \left(-\frac{z \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} c_{жс} R_0^2 w} \right) \times \exp \left(\frac{2 \cdot z \cdot \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} c_{жс} R_0 w} \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \right) + \bar{T}_0. \quad (22)$$

Используем известное свойство для произведения двух функций в пространстве изображений:

$$\bar{f}(s) \cdot \exp \left(-\frac{z}{w} \cdot s \right) \equiv \begin{cases} 0, & t < \frac{z}{w} \\ \varphi \left(t - \frac{z}{w} \right), & t > \frac{z}{w} \geq 0. \end{cases} \quad (23)$$

Для функции $\bar{f}(s) = \exp \left(\frac{2 \cdot z \cdot \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot R_0 \cdot w} \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \right)$ справедлив следующий переход от изображения к оригиналу:

$$\exp \left(\frac{2 \cdot z \cdot \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot R_0 \cdot w} \cdot \sqrt{\frac{s}{a_{ГР}}} \right) \equiv \operatorname{erfc} \left(\frac{z \cdot \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} c_{жс} R_0 w \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{a_{ГР}}} \right), \quad (24)$$

где $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-y^2) dy$.

С учетом (23) и (24), выражение (22) примет вид:

$$\bar{T}_{жс} = (\bar{T}_H - \bar{T}_0) \exp \left(-\frac{z \cdot \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot R_0^2 \cdot w} \right) \times \operatorname{erfc} \left(\frac{z \cdot \lambda_{ГР}}{\rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot R_0 w \cdot \sqrt{a_{ГР}} \cdot \sqrt{t - \frac{z}{w}}} \right) + \bar{T}_0 \quad (25)$$

или

$$\bar{T}_{жс} = (\bar{T}_H - \bar{T}_0) \exp \left(-\frac{z \cdot P_{ГР}}{R_0} \cdot \sqrt{\frac{a_{ГР}}{w}} \right) \times \operatorname{erfc} \left(\frac{z \cdot P_{ГР}}{\sqrt{w} \cdot \sqrt{t - \frac{z}{w}}} \right) + \bar{T}_0 \quad (26)$$

где $P_{ГР} = \frac{\lambda_{ГР}}{\rho_{жс} c_{жс} R_0 \sqrt{a_{ГР}} \cdot \sqrt{w}}$. (27)

Уравнение (26) получено без учета аккумулирующей способности металлических стенок трубопровода, т.к. рассматривалась модель однородного

окружающего массива. Однако такой подход даёт существенную погрешность при тепловом расчете процесса заполнения трубопроводов относительно небольшого диаметра и в это уравнение необходимо внести поправку, учитывающую отличие аккумулирующих способностей металла и грунта. Для ее оценки проведем следующий расчет. Количество тепла, необходимого для того, чтобы температура стенки трубопровода на дистанции в $L_{жс}$ метров выросла от T_0 до некоторой температуры T_{cp} , определяется по формуле:

$$Q_M = c_M \cdot \rho_M \cdot (T_{cp} - T_0) \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_0^2) \cdot L_{жс}, \quad (28)$$

где R_1 – внешний радиус трубы (м), c_M – теплоемкость металла (Дж/кг·К), ρ_M – плотность металла (кг/м³).

Использованная модель однородного массива для аккумулированного тем же объемом грунта количества тепла дает аналогичную формулу

$$Q_{ГР} = c_{ГР} \cdot \rho_{ГР} \cdot (T_{cp} - T_0) \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_0^2) \cdot L_{жс}, \quad (29)$$

где $c_{ГР}$ – теплоемкость грунта (Дж/кг·К), $\rho_{ГР}$ – плотность грунта (кг/м³).

Таким образом, разница $Q_M - Q_{ГР}$ и представляет собой неучтенную моделью часть тепла, которая идет на разогрев стенок трубопровода. Известно, что этот разогрев происходит за время порядка одной секунды [9], т.е. практически мгновенно. С учетом этого принимаем следующие допущения:

1. Температура стенки трубы в любой точке трубопровода равна средней температуре жидкости в данном сечении;

2. Средняя температура потока, заполняющего трубопровод, определяется по формуле

$$T_{CP} = (T_H + 2T_0) / 3; \quad (30)$$

3. Потеря тепла жидкостью в количестве $Q_M - Q_{ГР}$ происходит преимущественно за счет головной порции, температура которой при этом опускается от начальной температуры T_H до температуры грунта в ненарушенном состоянии T_0 .

В соответствии с этим объем, охлажденной за счёт металла стенок трубопровода части потока, может быть найден из выражения

$$V_{жс} = \frac{Q_M - Q_{ГР}}{c_{жс} \rho_{жс} (T_H - T_0)}. \quad (31)$$

В окончательном виде с учетом (28) и (29), получим

$$V_{жс} = \frac{(c_M \cdot \rho_M - c_{ГР} \cdot \rho_{ГР}) \cdot (T_{CP} - T_0) \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_0^2) \cdot L_{жс}}{c_{жс} \rho_{жс} (T_H - T_0)}. \quad (32)$$

Длина этой порции

$$L_M = \frac{(c_M \cdot \rho_M - c_{ГР} \cdot \rho_{ГР}) \cdot (T_{CP} - T_0) \cdot (R_1^2 - R_0^2) \cdot L_{жс}}{c_{жс} \rho_{жс} (T_H - T_0) \cdot R_0^2}. \quad (33)$$

Время её прохождения, через какое – либо сечение трубопровода равно $\frac{L_M}{w}$. Так как температура этой порции практически равна T_0 , то при этом не происходит изменений в тепловом режиме окружающего грунта. Поэтому уравнение (26) примет вид

$$T_{жс} = (T_H - T_0) \exp\left(-\frac{z \cdot P_{ГР}}{R_0} \cdot \sqrt{\frac{a_{ГР}}{w}}\right) \times \\ \times \operatorname{erfc}\left(\frac{z \cdot P_{ГР}}{\sqrt{w} \cdot \sqrt{t - \frac{z}{w} - \frac{L_M}{w}}}\right) + T_0 \quad (34)$$

или

$$T_{жс} = (T_H - T_0) \exp\left(-\frac{z \cdot P_{ГР}}{R_0} \cdot \sqrt{\frac{a_{ГР}}{w}}\right) \times \\ \times \operatorname{erfc}\left(\frac{z \cdot P_{ГР}}{\sqrt{L_{жс} - z - L_M}}\right) + T_0, \quad (35)$$

где $L_{жс} = w \cdot t$.

Полученное уравнение описывает изменение температуры жидкости по длине трубопровода и во времени для пусковых режимов в зависимости от параметров жидкости, трубопровода, окружающего грунта и скорости закачки.

При помощи уравнения, записанного в виде (35), можно находить распределение температур жидкости по заполненной части трубопровода на различных стадиях его заполнения. Например, если рассматривать распределение температур на момент появления жидкости в конечном сечении, т.е. когда $L_{жс}$ равно длине трубопровода, то величина $L_{жс}$ будет постоянной в формуле, а переменным будет расстояние z , отсчитываемое от начала трубопровода.

Уравнение в форме (34) более удобно, когда речь идёт об изучении изменения температуры жидкости во времени в процессе пуска в определенном сечении трубопровода. В этом случае является фиксированной величиной, а параметр $L_{жс}$ – переменной. Отсчет времени ведется от начала заполнения трубопровода.

Для оценки достоверности полученных формул было проведено сопоставление результатов расчета по (35) и экспериментальных данных из работы [10]. На рисунке 1 показано изменение во времени тем-

пературы жидкости в конечном сечении трубопровода.

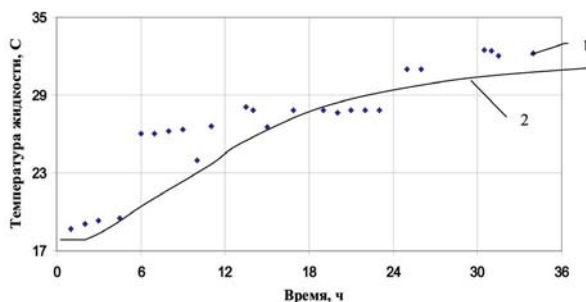


Рисунок 1. Изменение температуры жидкости в конце участка трубопровода (с момента появления там жидкости) 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты расчета по формуле (35)

Условия эксперимента следующие. Проводилось заполнение участка подземного нефтепровода Узень - Гурьев длиной 80 км нефтью, нагретой до температуры 45 °С. Производительность закачки 1930 т/ч. Трубопровод уложен в грунт, коэффициент теплопроводности которого 0,92 Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности 0,0022 м²/ч. Температура грунта в ненарушенном тепловом состоянии 18 °С. Закачиваемая нефть характеризуется плотностью 840 кг/м³ и теплоемкостью 2100 Дж/(кг·К). Диаметр трубопровода не приведен. Полагали, аналогично тому, как это было сделано в работе [1] при описании данного эксперимента, что диаметр равен 1,02 м. Для проведения расчета по формуле (30) нашли среднюю температуру жидкости в трубопроводе (27 °С) и по (33) определили протяженность порции в головной части потока, охлаждение которой обусловлено стенками трубопровода; она равна 1232 м. Величина Z в данном случае являлась фиксированной и равной 80 000 м. Переменным был параметр $L_{ж}$, характеризующий количество прошедшей через конечное сечение жидкости. По рисунку 1 видно, что для выбранного параметра трубопровода расчетная кривая достаточно хорошо описывает характер распределения экспериментальных точек. Относительная величина среднеквадратического отклонения составляет 6,7%.

Еще одно сравнение. На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования процесса заполнения 80-километрового нефтепровода диаметром 0,8 м нагретой до 60 °С нефтью [9]. Производительность закачки 275 кг/с. Плотность нефти 890 кг/м³, теплоемкость 2100 Дж/(кг·К). Коэффициент температуропроводности грунта 0,002 м²/ч, его температура в ненарушенном состоянии 10 °С. Коэффициент теплопроводности грунта не приведен, поэтому полагали, в соответствии со всеми остальными численными расчетами в [9], что он равен 1 Вт/(м·К). Приведенные на рисунке 2 данные

по изменению температуры жидкости в конечном сечении трубопровода в процессе пуска сопоставлены с результатами расчета по формуле (35). За начало отсчета времени и в этом случае принят момент появления жидкости в конечном сечении. Расхождение результатов оставляет десятые доли градуса. Расчет по формуле (33) позволил определить длину головной охлажденной порции –1568 м, что составляет 2% от длины участка трубопровода. Погрешность, обусловленная отличием реального процесса прогрева стенок трубопровода и принятого в используемой модели, будет вносить тем меньший вклад в расчетные данные, чем меньше такой параметр трубопровода, как отношение толщины его стенки к диаметру. Этот параметр характеризует общий объем металла в заполняемом трубопроводе по отношению к емкости трубопровода.

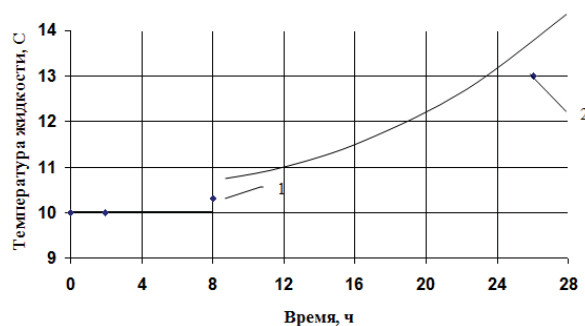


Рисунок 2. Изменение температуры жидкости в конце участка трубопровода (с момента появления там жидкости) 1 – результаты численного моделирования; 2 – результаты расчета по формуле (35)

Таким образом, формула (35) достаточно хорошо описывает температурный режим жидкости, заполняющей подземный неизолированный «горячий» трубопровод. В случае рассмотрения теплоизолированного трубопровода параметры грунта в формулах заменяются на параметры теплоизоляции, что может быть допущено для режима заполнения в силу его относительной непродолжительности.

Выводы

Получены расчетные зависимости для определения температуры жидкости, заполняющей подземный непрогретый трубопровод, без использования коэффициента теплопередачи от жидкости в окружающую среду. Результаты сопоставления расчетных данных с экспериментальными дают относительную величину среднеквадратического отклонения в 6,7%, что позволяет рекомендовать полученную формулу для практического применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Тугунов П. И. Нестационарные режимы перекачки нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1984. 224 с.
- 2 Тугунов П. И., Новоселов В. Ф. Транспортирование вязких нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам. М.: Недра, 1973. 89 с.
- 3 Лурье М. В. Алгоритм расчета квазиустановившихся режимов неизотермической перекачки нефти // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 2. С. 28-31.
- 4 Гarris Н. А., Гarris Ю. О., Глушкова А. А. Построение динамической характеристики магистрального трубопровода (модель вязкопластичной жидкости) // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2004. № 1. С. 5.
- 5 Разработка методических основ и программного комплекса с использованием математической модели действующего неизотермического нефтепровода /А. Г. Гумеров, А. А. Шутов, К. Ю. Штукатуров, В. Т. Федоров, И. В. Стрижков // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2006. № 2. С. 20.
- 6 Губин В. Е., Губин В. В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Недра. 1982. 296 с.
- 7 Расчет теплогидравлических потерь по длине неизотермического магистрального нефтепровода и в лабораторном стенде, моделирующем реальный трубопровод /В. О. Некучаев, П. А. Кырнышева, К. С. Костерин, И. Ф. Чупров // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2014. № 6. С. 465-480.
- 8 Галиуллин М. М. Разработка методов повышения экономичности и эффективности эксплуатации теплоизолированных трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.13. Уфа, 1987. 177 с.
- 9 Тугунов П. И. Тепловая изоляция нефтепродуктопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1985. 152 с.
- 10 Агапкин В. М., Губин В. В. Пусковые режимы трубопроводов для транспорта вязких подогретых нефтей и нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М.: ВНИИОЭНГ, 1980. 52 с.

REFERENCES

- 1 Tugunov P. I. Nestacionarnye rezhimy perekachki neftej i nefteproduktov. M.: Nedra, 1984. 224 s. [in Russian].
- 2 Tugunov P. I., Novoselov V. F. Transportirovanie vjazkich neftej i nefteproduktov po truboprovodam. M.: Nedra, 1973. 89 s. [in Russian].
- 3 Lur'e M. V. Algoritm rascheta kvaziustanovivshijsja rezhimov neizotermicheskoj perekachki nefti // Nauka i tehnologija truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov. 2014. № 2. S. 28-31. [in Russian].
- 4 Garris N. A., Garris Ju. O., Glushkova A. A. Postroenie dinamicheskoj harakteristiki magistral'nogo truboprovoda (model' vjazkoplastichnoj zhidkosti) // Neftegazovoe delo: jelektron. nauch. zhurn. 2004. № 1. S. 5. [in Russian].
- 5 Razrabotka metodicheskikh osnov i programmnogo kompleksa s ispol'zovaniem matematicheskoj modeli dejstvujushhego neizotermicheskogo nefteprovoda /A. G. Gumerov, A. A. Shutov, K. Ju. Shtukaturov, V. T. Fedorov, I. V. Strizhkov // Neftegazovoe delo: jelektron. nauch. zhurn. 2006. № 2. S. 20. [in Russian].
- 6 Gubin V. E., Gubin V. V. Truboprovodnyj transport nefti i nefteproduktov. M.: Nedra. 1982. 296 s. [in Russian].
- 7 Raschet teplogidravlicheskih poter' po dljne neizotermicheskogo magistral'nogo nefteprovoda i v laboratornom stende, modelirujushhem real'nyj truboprovod /V. O. Nekuchaev, P. A. Kymysheva, K. S. Kosterin, I. F. Chuprov // Neftegazovoe delo: jelektron. nauch. zhurn. 2014. № 6. S. 465-480. [in Russian].
- 8 Galiullin M. M. Razrabotka metodov povyshenija jekonomichnosti i jeffektivnosti jekspluatacii teploizolirovannyh truboprovodov: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.15.13. Ufa, 1987. 177 s. [in Russian].
- 9 Tugunov P. I. Teplovaja izoljacija nefteproduktoprovodov i rezervuarov. M.: Nedra, 1985. 152 s. [in Russian].
- 10 Agapkin V. M., Gubin V. V. Puskovye rezhimy truboprovodov dlja transporta vjazkich podogretyh neftej i nefteproduktov // Transport i hranenie nefti i nefteproduktov. M.: VNIIOJeNG, 1980. 52 s. [in Russian].

- Галиуллин М. М., канд. техн. наук, доцент кафедры «Математика» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
M. M. Galiullin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Mathematics», FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation
e-mail: galiullinm2015@yandex.ru
- Валеев А. Р., канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
A. R. Valeev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Transport and Storage of Oil and Gas», FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation
- Баязитов М. И., канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
M. I. Bayazitov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Technological Machines and Equipment», FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation
- Репин В. В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
V. V. Repin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Heat Power Industry», FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation
- Аносова Е. П., старший преподаватель кафедры «Математика» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
E. P. Anosova, Senior Lecturer of the Chair «Mathematics», FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation