

О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ

About temperature distribution law in oil mainlines with intermediate pumping stations

It is demonstrated on the basis of theoretical study and experiments that when the rule of temperature distribution along the length of oil mainline is determined, besides heat transfer to the environment it is necessary to consider also for the heat resulting from expansion of oil moving along the pipeline, heat of oil heat in the pump due to adiabatic compression and mechanical energy dissipation, and heat of oil heat during excess pressure throttling down at OPS.

Д.П. Ким,
Ш.И. Рахматуллин,
Институт проблем транспорта
энергоресурсов,
г. Уфа

При проведении тепловых расчетов магистральных нефтепроводов наряду с учетом теплопередачи в окружающую среду и тепла трения в линейной части трубопровода возникает вопрос необходимости учета тепла, выделяемого в процессе расширения жидкости в результате диссипации механической энергии, т.е. потерь давления, обусловленных действием сил трения жидкости, нагрева нефти в магистральном насосе, нагрева нефти при дросселировании избыточного давления, а также на запорной арматуре.

В общем виде уравнение первого начала термодинамики применительно к системе «жидкость — нефтепровод — окружающая среда» можно записать в следующем виде [1]

$$q = u_1 - u_2 + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 + l_t + \frac{W_2^2}{2} - \frac{W_1^2}{2} + g(H_2 - H_1) \quad (1)$$

Здесь q — тепло, полученное жидкостью за счет сил трения при перемещении жидкости по линейной части трубопровода за вычетом тепла, передаваемого в окружающую среду;

u_1, u_2 — соответственно внутренняя энергия жидкости на входе и на выходе рассматриваемого участка трубопровода;

p_1, p_2 — соответственно давление на входе и выходе участка трубопровода;

v_1, v_2 — соответственно удельный объем нефти на входе и выходе участка трубопровода;

l_t — техническая работа, совершаемая насосом над потоком жидкости (или обратно совершаемая жидкостью над турбиной) в пределах рассматриваемого участка трубопровода;

$g(H_1 - H_2)$ — разность потенциальных энергий жидкости на входе и выходе участка трубопровода.

Пренебрегая для упрощения изменением потенциальной и кинетической энергий потока, а также полагая $l_t = 0$, получим с учетом термодинамического соотношения $u + pv = i$ следующее выражение

$$q = i_2 - i_1, \quad (2)$$

где $i_2 - i_1$ — соответственно энтальпия жидкости на входе и выходе трубопровода.

Выражая величину q как разность тепла, получаемого за счет диссипации механической энергии, и тепла, отдаваемого жидкостью в окружающую среду, получим

$$M \cdot g \cdot J \cdot dL - k \cdot \pi \cdot D \cdot (t - t_o) dL = (i - i_1) M, \quad (3)$$

где M — массовый расход жидкости, J — гидравлический уклон трубопровода, dL — элементарная длина трубопровода, k — полный коэффициент теплопередачи от нефти в окружающую среду, t_o — температура окружающей среды (грунта).

Используя известное термодинамическое соотношение для энтальпии

$$d_i = C_p \cdot dT - \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp = C_p \cdot dT - C_p \cdot D_i \cdot dp, \quad (4)$$

выражение (3) можно записать как $M \cdot g \cdot J \cdot dL - k \cdot \pi \cdot D \cdot (t - t_o) dL = [C_p \cdot dT - C_p \cdot D_i \cdot dp] \cdot M, \quad (5)$

где $D_i = \frac{1}{C_p} \cdot \left[T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right]$ — коэффициент Джоуля — Томсона.

Это уравнение можно представить в виде, удобном для интегрирования,

$$\frac{k \cdot \pi \cdot D}{C_p \cdot M} \cdot dL = \frac{dt}{\left[-(t-t_0) + \frac{M \cdot g \cdot J}{k \cdot \pi \cdot D} + \frac{dt}{\frac{M \cdot C_p}{k \cdot \pi \cdot D} \cdot \frac{dp}{dL} \cdot D_i} \right]} \quad (6)$$

Введем обозначения

$$a = \frac{k \cdot \pi \cdot D}{C_p \cdot M}, \quad b = \frac{M \cdot g \cdot J}{k \cdot \pi \cdot D}, \quad c = \frac{M \cdot C_p}{k \cdot \pi \cdot D} \cdot \frac{dp}{dL} \cdot D_i$$

Проинтегрировав выражение (6) при $k = \text{const}$ и $\frac{dp}{dL} = -\frac{p_H - p_K}{L} = \text{const}$, получим

$$a \int_0^L dL = - \int_{t_H}^{t_K} \frac{dt}{(t-t_0) - b^*} \quad (7)$$

где t_H и t_K , p_H и p_K — соответственно температуры и давления в начале и конце трубопровода, $b^* = b + c$.

Интегрирование выражения (7) приводит к следующему соотношению

$$aL = \ln \frac{t_H - t_0 - b^*}{t_K - t_0 - b^*} \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует искомая зависимость прироста температуры в трубопроводе за счет тепла трения и процесса адиабатического расширения нефти

$$t_k - t_0 = (t_H - t_0) \cdot e^{-\frac{L}{a} b^*} + b^* (1 - e^{-\frac{L}{a} b^*}) = (t_H - t_0) \cdot e^{-\frac{L}{a} b^*} + (1 - e^{-\frac{L}{a} b^*}) \cdot b (1 + \frac{c}{b}) \quad (9)$$

При $c = 0$ формула (9) преобразуется в формулу Шухова с учетом тепла трения [2].

Представляет интерес на конкретном примере произвести оценку величины множителя $(1 + \frac{c}{b})$. Для чего выполним расчет распределения температуры по длине нефтепровода со следующими исходными данными: нефтепровод длиной $L = 70$ км и диаметром $d = 1,0$ м перекачивает нефть с массовым расходом $M = 1980, 1920$ и 1800 кг/с; плотность нефти $\rho = 860$ кг/м³; вязкость нефти $\nu = 0,2$ см²/с; удельная массовая

теплоемкость нефти $C_p = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, коэффициент Джоуля-Томсона $D_i = -0,045 \cdot 10^{-5} \frac{\text{К} \cdot \text{м}^2}{\text{Н}}$, геодезические отметки начала и конца нефтепровода $Z_H = 70$ м, $Z_K = 150$ м, температура нефти в начале участка $t_H = 44^\circ\text{C}$ и температура окружающей среды $t_0 = 19^\circ\text{C}$.

Множитель $(1 + \frac{c}{b})$, учитывающий эффект Джоуля-Томсона, запишем в следующем виде

$$\left(1 + \frac{c}{b}\right) = \left(1 + \frac{M \cdot C_p}{\kappa \cdot \pi \cdot d} \cdot \frac{dp}{dL} \cdot D_i \cdot \frac{\kappa \pi d}{MgJ}\right) = \left(1 + C_p \cdot \frac{dp}{dL} \cdot D_i \cdot \frac{1}{gJ}\right)$$

1. Определим производную $\frac{dp}{dL}$

$$\frac{dp}{dL} = \frac{p_K - p_H}{L} = \frac{[-(Z_K - Z_H) - h_w] \cdot g \cdot \rho}{L}$$

$$= \frac{[-(150 - 70) - 495,3] \cdot 9,81 \cdot 860}{70 \cdot 10^3} =$$

$$= -8,22 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 860 = -69,34 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$

$$h_w = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{W^2}{2g} = \frac{0,3164}{(1,466 \cdot 10^5)^{0,25}} \cdot$$

$$\frac{70 \cdot 10^3}{1} \cdot \frac{2,93^2}{19,62} = 495,3 \text{ м,}$$

$$\text{где } W = \frac{M \cdot 4}{\rho \cdot \pi d^2} = \frac{1980 \cdot 4}{860 \cdot 3,14 \cdot 1^2} = 2,93 \text{ м/с;}$$

$$\text{Re} = \frac{W \cdot d}{\nu} = \frac{2,93 \cdot 1}{0,2 \cdot 10^{-4}} = 1,466 \cdot 10^5$$

2. Определим гидравлический уклон J

$$J = \frac{h_w}{L} = \frac{495,3}{70 \cdot 10^3} = 7,07 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{м}}$$

3. Определим множитель

$$\left(1 + \frac{c}{b}\right) = 1 + 2 \cdot 10^3 \cdot (-69,34) \cdot (-0,045 \cdot 10^{-5}) \cdot$$

$$\frac{1}{9,81 \cdot 7,07 \cdot 10^{-3}} = 1 + 0,968 = 1,968$$

Аналогично выполнен расчет для режимов работы нефтепровода с массовыми расходами $M = 1920$ и 1800 кг/с.

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Из результатов расчета данного примера видно, что величина прироста температуры за счет процесса адиабатического расширения нефти одного порядка, что и величина прироста температуры за счет трения потока нефти при движении по трубопроводу. Из этого следует, что при определении закона распределения температуры по длине нефтепровода кроме учета теплоты трения необходимо учитывать теплоту, обусловленную процессом расшире-

Таблица. Зависимость температуры нефти на конце участка нефтепровода от массового расхода.

M, кг/с	$(t_H - t_0) \cdot e^{-\lambda y}$	$b(1 - e^{-\lambda y})$	$(1 - e^{-\lambda y})b\left(1 + \frac{a}{b}\right)$	Температура нефти на конце участка трубопровода по (9) с учетом столбцов			
				2	3	4	
	1	2	3	4	5	6	7
1980	21,88	2,26	4,45	40,88	43,14	45,33	
1920	21,80	2,20	4,24	40,80	43,00	45,04	
1800	21,62	1,88	3,12	40,62	42,5	43,74	

ния нефти при ее перемещении по трубопроводу.

Уравнение (1) применительно к системе «жидкость + насос + окружающая среда» при пренебрежении изменением кинетической и потенциальной энергий жидкости ($W_1 = W_2$, $H_1 \approx H_2$) может быть представлено в следующем виде

$$Q^* + Q^{**} = i_2 - i_1 - v \cdot dp, \quad (10)$$

где Q^* — тепло внешнего теплообмена, осуществляемое за счет теплообмена через боковую поверхность потока (в нашем случае через поверхность насоса); Q^{**} — тепло внутреннего теплообмена, осуществляемое за счет преобразования в тепло работы трения; i_2, i_1 — энтальпия жидкости на выходе и входе насоса, $(-vdp)$ — располагаемая работа потока, идущая на совершение технической работы насосом над жидкостью (повышение давления жидкости в насосе на величину $dp = p_2 - p_1$), v — удельный объем жидкости.

Количество тепла внутреннего теплообмена Q^{**} очевидно в точности соответствует величине диссипации механической энергии потока в проточной части насоса и численно равно тепловому эквиваленту разности потребляемой N_B и полезной мощности N_n насоса

$$Q^{**} = N_B - N_n = N_n \cdot \left(\frac{1 - \eta}{\eta}\right) = \frac{v \cdot (p_2 - p_1)}{\eta} (1 - \eta) \quad (11)$$

С учетом уравнений (11) и (4) соотношение (10) в дифференциальной форме может быть записано как

$$dQ^* + v \cdot dp \cdot \left(\frac{1 - \eta}{\eta}\right) = C_p dT - C_p \cdot D_i dp - v dp \quad (12)$$

Пренебрегая в уравнении (12) величиной внешнего теплообмена ($dQ^* = 0$) после интегри-

рования, получим зависимость для расчета нагрева нефти в насосе с учетом ее адиабатического сжатия и диссипации механической энергии в проточной части насоса:

$$T_2 - T_1 = \frac{v}{C_p} (p_2 - p_1) \frac{1 - \eta}{\eta} + D_i (p_2 - p_1) + \frac{v}{C_p} (p_2 - p_1) \quad (13)$$

Пример расчета с исходными данными: магистральным насосом НМ 10000-210 перекачивается нефть при следующих параметрах: дифференциальный перепад давления в насосе $\Delta p = 20,6 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2}$, коэффициент полезного действия насоса $\eta = 0,81$, плотность нефти $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость нефти

$$C_p = 2 \cdot 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot K}$$

$$\begin{aligned} \Delta t = t_2 - t_1 &= \frac{1}{860} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^3} \cdot 20,6 \cdot 10^5 \cdot \frac{1 - 0,81}{0,81} + \\ &+ (-0,045 \cdot 10^{-5}) \cdot 20,6 \cdot 10^5 + \\ &+ \frac{1}{860} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^3} \cdot 20,6 \cdot 10^5 = 0,280 - 0,886 + 1,200 = \\ &= 0,28 + 0,314 = 0,594^\circ C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta t = t_2 - t_1 &= \frac{1}{860} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^3} \cdot 19,9 \cdot 10^5 \cdot \frac{1 - 0,81}{0,81} + \\ &+ (-0,045 \cdot 10^{-5}) \cdot 19,9 \cdot 10^5 + \\ &+ \frac{1}{860} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^3} \cdot 19,9 \cdot 10^5 = \\ &= 0,271 - 0,895 + 1,190 = 0,573^\circ C \end{aligned}$$

Для данного примера учет адиабатического сжатия нефти в насосе свидетельствует о том, что термодинамический эффект является существенным и по своей величине превосходит нагрев, обусловленный диссипацией механической энергии $\frac{0,314}{0,28} = 1,12$ раза.

При расчетах теплового режима нефтепровода вопрос об изменении температуры нефти при дросселировании избыточного напора на НПС может иметь существенное значение. Для решения задачи построения расчетной зависимости изменения температуры нефти при дросселировании потока рассмотрим уравнение (10), где индексы 1 и 2 относятся к условиям до и после дроссельного органа.

Количество тепла внешнего теплообмена может быть представлено следующим соотношением:

$$Q^* = -k \cdot F \cdot (t - t_0), \quad (14)$$

где k — полный коэффициент теплопередачи, F — площадь поверхности внешнего теплообмена, t — температура нефти, t_0 — наружная температура окружающей среды.

Вторая часть теплового потока Q^{**} — тепло внутреннего теплообмена, осуществляемое за счет преобразования в тепло работы, затрачиваемой на местное гидравлическое сопротивление, очевидно, в точности равна тепловому эквиваленту работы, затрачиваемой потоком нефти при прохождении местного гидравлического сопротивления — дроссельного органа:

$$Q^{**} = L_{dp} = v \cdot dp = v \cdot (p_1 - p_2) \quad (15)$$

Слагаемое в правой части уравнения (10) величина — $v \cdot dp$ представляет собой потенциальную работу, расходуемую в нашем случае на преодоление местного гидравлического сопротивления, и может быть представлена выражением

$$-v \cdot dp = v \cdot (p_1 - p_2) \quad (16)$$

С учетом зависимостей (14) — (16) уравнение первого начала термодинамики приобретает вид

$$-k \cdot F \cdot (t - t_0) + \frac{v}{C_p} (p_1 - p_2) = C_p \cdot (t_2 - t_1) - C_p \cdot D_i (p_2 - p_1) + v \cdot (p_1 - p_2) \quad (17)$$

При пренебрежении величиной внешнего теплообмена в уравнении (17), нагрев нефти в дросселирующем устройстве будет равен

$$t_2 - t_1 = D_i \cdot (p_2 - p_1) \quad (18)$$

Поскольку при дросселировании $p_2 < p_1$ знак « \rightarrow » при коэффициенте D_i означает, что $t_2 - t_1 > 0$, т.е. при дросселировании нефть нагревается.

Для более точных расчетов коэффициент Джоуля — Томсона может быть рассчитан по формуле

$$D_i = -\frac{v}{C_p} \cdot (1 - t \cdot \alpha), \quad (19)$$

где α — коэффициент термического расширения нефти $1/^\circ\text{C}$, определенный по справочным данным, $v = 1/\rho$ — удельный объем.

Пример расчета.

Определить нагрев нефти, проходящей через игольчатый кран, при следующих значениях перепада давления $\Delta p = 10 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $30 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $40 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Температура нефти перед краном $t = 20^\circ\text{C}$, плотность $\rho_n = 860 \text{ кг/м}^3$,

удельная теплоемкость нефти $C_p = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Порядок расчета:

1. Определяем для плотности $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$ по справочным данным значение коэффициента термического расширения: $\alpha = 0,000783 \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

2. Определяем коэффициент Джоуля — Томсона

$$D_i = -\frac{1,16 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^3} \cdot (1 - 20 \cdot 0,000783) = -0,057 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Дж}}$$

3. Определяем нагрев нефти в дросселирующем устройстве:

— при $\Delta p = 10 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$: $t_2 - t_1 = -0,057 \cdot 10^{-5} (-10 \cdot 10^5) = 0,57^\circ\text{C}$;

— при $\Delta p = 20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$: $t_2 - t_1 = -0,057 \cdot 10^{-5} (-20 \cdot 10^5) = 1,14^\circ\text{C}$;

— при $\Delta p = 30 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$: $t_2 - t_1 = -0,057 \cdot 10^{-5} (-30 \cdot 10^5) = 1,71^\circ\text{C}$;

— при $\Delta p = 40 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$: $t_2 - t_1 = -0,057 \cdot 10^{-5} (-40 \cdot 10^5) = 2,28^\circ\text{C}$.

При определении температуры нефти на участке нефтепровода замер напора производится при помощи датчиков, врезанных в трубопровод перед насосами или термометром в струе нефти из спускного крана камер пуска и

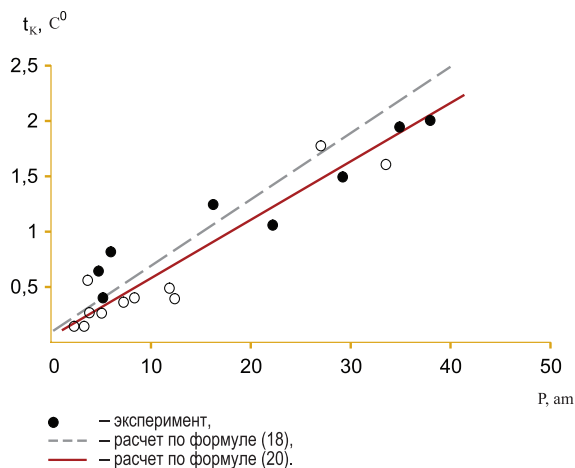


Рисунок. Зависимость нагрева нефти от перепада давления на игольчатом кране

приема очистного устройства или обвязке насоса. Согласно [4] при таком способе замера температура нефти определяется зависимостью

$$\Delta t = 0,005 \cdot H, \quad (20)$$

где H — напор в точке замера, м.

На рисунке приведены данные расчета по формулам (18), (20) и результаты экспериментальных замеров повышения температуры нефти при прохождении через игольчатый кран [3].

Выводы

1. При определении закона распределения температуры по длине нефтепровода кроме теплоты трения необходимо учитывать теплоту, обусловленную процессом расширения нефти при ее перемещении по трубопроводу, теплоту нагрева нефти в насосе за счет адиабатического сжатия и диссипации механической энергии, теплоту нагрева нефти при дросселировании избыточного напора на НПС.

2. Предложена зависимость для расчета нагрева нефти в насосе с учетом ее адиабатического сжатия и диссипации механической энергии в проточной части насоса.

3. Предложена зависимость для определения нагрева нефти при дросселировании избыточного напора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугунов П.И., Самсонов А.Л. Основы теплотехники, тепловые двигатели и паросиловое хозяйство нефтебаз и перекачивающих станций. — М.:Недра. — 1979. — 272 с.

2. Белоусов В.Д., Блейхер Э.М., Немудров А.Г., Юфин В.А., Яковлев Е.И. Трубопроводный транспорт нефти и газа. — М.:Недра. — 1978. — 407 с.

3. Требин Г.Ф., Капырин Ю.В., Петухов В.Н. Экспериментальное изучение изменения температур при дросселировании нефти//Сборник научных трудов Всесоюзного нефтегазового научно-исследовательского института «Исследование в области разработки нефтяных месторождений и гидродинамики пласта». — 1974. — вып. 49. — с. 74 — 79.

4. Положение о проведении работ по очистке внутренней полости магистрального нефтепровода. — М.: АК «Транснефть». — 1998. — 50 с.



Ким Дмитрий Петрович,
к.т.н. и.о. первого заместителя

генерального директора по эксплуатации КТК
Тел.: (095) 745-87-70



Рахматуллин Шамиль Исмагилович,
к.т.н., с.н.с.,
заведующий отделом
ГУП «ИПТЭР»
Тел.: (3472) 31-36-95

www.ogbus.ru

Ким Д.П., Рахматуллин Ш.И.

СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО НАПОРА, ПОДАЧИ И АДИАБАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НЕФТИ НА ЕЕ НАГРЕВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ

http://www.ogbus.ru/authors/KimDP/KimDP_1.pdf

При перекачке по магистральным нефтепроводам большой протяженности с большим числом промежуточных насосных станций помимо тепла трения необходимо учитывать нагрев нефти в магистральных насосах. Особенно это становится важ-

ным в связи с проектированием насосных станций, на которых развиваемое дифференциальное давление составляет порядка 10 и более МПа. В статье рассмотрены вопросы и определена степень влияния на нагрев нефти в насосах таких факторов как величина дифференциального напора, подачи и адиабатического сжатия.

Рахматуллин Ш.И., Гареев М.М., Ким Д.П.

О ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ СЛАБОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

http://www.ogbus.ru/authors/Rahmatullin/Rahmatullin_1.pdf

В статье представлены исследования, позволяющие найти предельные числа Рейнольдса, для которых имеет место эффект Томса — снижение турбулентного трения в трубе, а так же сформулировать целенаправленные требования к синтезу противотурбулентной присадки (по молекулярной массе, характеристической вязкости) с учетом тех условий, в которых ее планируется применять.

www.ogbus.ru