МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВНИИСПТнефть

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКАЧКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ С ПУТЕВЫМ ПОДОГРЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

РД 39-1-1134-84

1984

gost.e-ecolog.ru

Министерство нефтяной промышленности

ВНИИСПТнефть

Утвержден
первым заместителем
министра
В.И.Игревским
25 июля 1984г.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

М Е Т О Д И К А
РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКАЧКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ С ПУТЕВЫМ ПОДОГРЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

РД 39-I-II34-84

1984

В настоящей методике изложен порядок определения теплогидравлических параметров и параметров средств перекачки высоковязкой жидкости по трубопроводу с внутренним и внешним путевым подогревом теплоносителем.

Приведены теоретические формулы, позволяющие производить расчёты изменения температуры перекачиваемых жидкостей и потерь напора по длина трубопроводов при движении жидкостей в попутном (прямоток) и встречном (противоток) направлениях, определять диаметры трубопроводов, расход теплоносителя и затраты мощности для нагреваемой вязкой жидкости и теплоносителя. Дан пример расчёта.

Методика предназначена для научно-исследовательских, проектно-конструкторских и производственных организаций, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации трубопроводов с путевым подогревом.

Методика разработана сотрудниками института ВНИИСПТнефть Свиридовым В.П., Болдовым Н.Г., Свиридовым В.В.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКАЧКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ С ПУТЕВЫМ ПОДОГРЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

РД 39- I-II34-84

Вводится впервые

Приказом Министерства нефтяной промышленности
от 15 августа 1984 г. № 509
Срок введения установлен с I сентября 1984 г.
Срок действия до I сентября 1989 г.

Настоящая методика устанавливает порядок определения теплогидравлических параметров и параметров средств перекачки высоковязкой жидкости по трубопроводу с путевым подогревом теплоносителем.

Методика предназначена для использования работниками научно-исследовательских, проектно-конструкторских и производственных организаций Министерства нефтяной промышленности при расчетах указанных параметров на стадиях технико-экономических обоснований выбора способа транспортирования вязкой нефти и эксплуатации трубопроводов, перекачивающих высоковязкую жидкость с путевым подогревом теплоносителем.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Расчет теплогидравлических параметров и параметров средств перекачки вязкой жидкости по трубопроводу с путевым подогревом теплоносителем приводится в методике для следующих двух схем расположения трубопроводов:

а) трубопровод типа "труба в трубе" с внешней тепловой

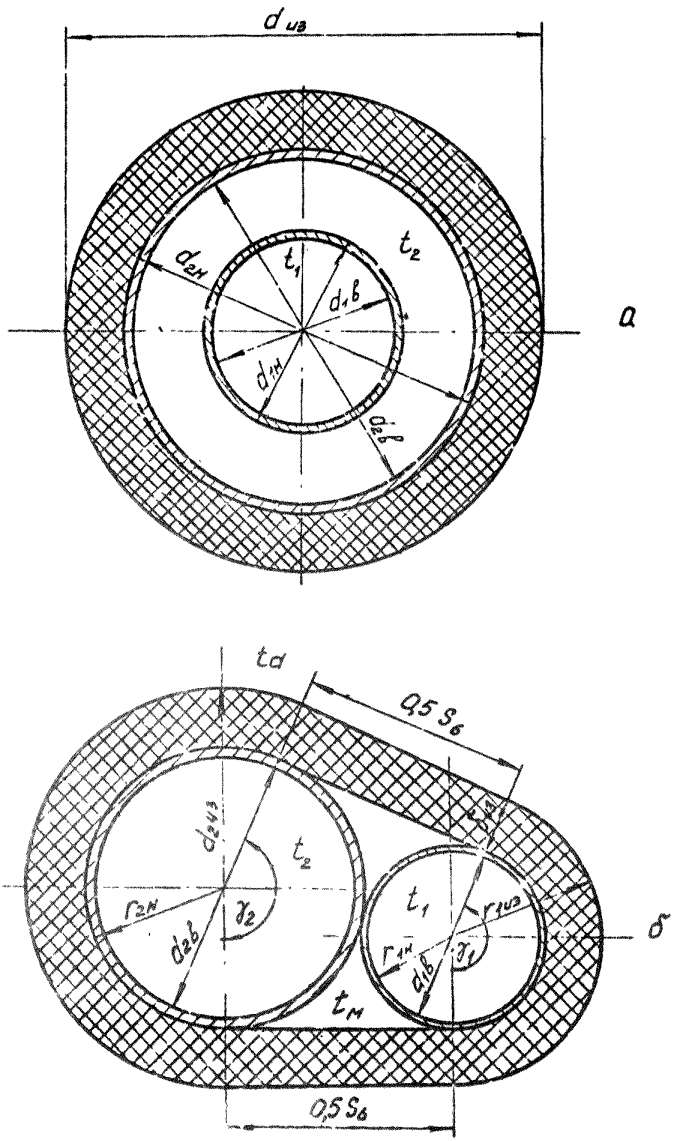

Рис. Теплоизолированный трубопровод с путевым подогревом теплоносителем:

а - внутренний подогрев;

б - внешний подогрев.

изоляцией, т.е.теплопровод, внутри которого соосно или с некоторым эксцентриситетом расположен другой трубопровод меньшего диаметра (см.рис.*а*)

б) два параллельных трубопровода, соприкасающиеся по всей длине своими внешними образующими линиями, в одной тепловой изоляции (см.рис. *б*)

I.2. Методика позволяет производить расчеты изменения температуры перекачиваемых жидкостей и потерь напора по длине трубопроводов при движении жидкостей в попутном(прямоток) и встречном (противоток) направлениях. При этом перекачка более нагретой жидкости (теплоносителя) может осуществляться как по трубопроводу меньшего диаметра, так и по трубопроводу большего диаметра или по межтрубному пространству.

I.3. В качестве теплоносителя при перекачке вязкой жидкости по трубопроводу с путевым подогревом может использоваться горячая вода, незамерзающая жидкость, например, керосин, дизельное топливо и др.

I.4. Методика позволяет также, используя ряд исходных данных, определять диаметры трубопроводов, расход теплоносителя и затраты мощности для перекачки нагреваемой вязкой жидкости и теплоносителя.

I.5. Температуру перекачиваемой высоковязкой жидкости в конечном пункте трубопровода целесообразно в расчетах принимать на 3-5°C выше температуры ее застывания.

I.6. Расчетные давления жидкостей в трубопроводах и межтрубном пространстве не должны превышать допустимых значений прочности трубопроводов.

I.7. В данной методике приняты следующие обозначения:

q – производительность перекачки жидкости по трубопроводу, м^3/с;

L – длина трубопровода, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2;

U – скорость движения жидкости по трубопроводу, м/с;

i – гидравлический уклон при движении жидкости по трубопроводу;

ρ, c – плотность и теплоемкость жидкости, кг/м^3 и Дж/кг К, соответственно;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м^2/с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м К;

$d_{1н}, d_{1в}, d_{2н}, d_{2в}$ – наружный и внутренний диаметры трубопроводов, спутника и основного, м, соответственно;

$d_э = d_{2в} - d_{1н}$ – эквивалентный диаметр межтрубного пространства, м;

t – температура перекачиваемых по трубопроводам жидкостей, К;

H – потери напора при перекачке жидкостей, м;

A – крутизна вискограммы перекачиваемых жидкостей;

β, m – коэффициенты в уравнении Л.С.Лейбензона для расчета потерь напора;

x – текущее значение длины трубопровода, м; ось X направлена по ходу движения жидкости в трубопроводе меньшего диаметра и производительностью q_1 ;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^{2}К;

κ – коэффициент теплопередачи, Вт/м^{2}К;

$Re = \frac{Ud}{\nu}$; $Pr = \frac{\rho c \nu}{\lambda}$; $Gr = \frac{g\beta d^3(t-t_0)}{\nu^2}$ – параметры Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа при движении жидкостей по трубам;

e – расстояние между центрами внутренней и наружной труб, м;

S_3 – длина дуги окружности диаметром $d_{1в}$, ограниченная центральным углом γ_1° , м;

S_4 – длина дуги окружности диаметром $d_{1в}$, ограниченная центральным углом $(\gamma - \gamma_1^\circ)$, м;

S_5 – длина дуги окружности диаметром $d_{2б}$, ограниченная центральным углом γ_2°, м;

S_6 – длина тепловой изоляции, через которую идет тепловой поток от воздуха между трубами в окружающий воздух с температурой t_a; м;

$S_г$ – длина дуги окружности диаметром $d_{2б}$, ограниченная центральным углом ($1-\gamma_2^\circ$), м.

Индексы относятся:

I – к трубопроводу-спутнику, к параметрам жидкости, перекачиваемой по нему;

2 – к основному трубопроводу, к параметрам жидкости, перекачиваемой по нему;

Н и К – к параметрам жидкости в начале и в конце трубопровода соответственно;

a – к температуре окружающего воздуха и к параметрам жидкости при этой температуре;

$из$ – к параметрам тепловой изоляции;

$ст$ – к стенке трубопровода и жидкости в пристенном слое.

2. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКАЧКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ С ПУТЕВЫМ ПОДОГРЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ТИПА "ТРУБА В ТРУБЕ"

В основу методики положено решение дифференциальных уравнений передачи тепла от более нагретой к менее нагретой жидкости с учетом теплоты трения жидкости при ее движении по трубопроводам и потери тепла в окружающий воздух.

2.1. Изменение температуры жидкости по длине трубопровода-спутника:

$$t_1 = m_1 + M_1 e^{n_1 x} + M_2 e^{n_2 x}, \qquad (I)$$

где $$m_1 = t_0 + \frac{\beta + z}{\alpha \cdot \beta \cdot c_1} i_1 + \frac{i_2}{\beta c_2};$$

$$\alpha = \frac{\kappa_1 \cdot \pi \cdot d_{1в}}{q_1 \rho_1 \cdot c_1}; \quad \beta = \frac{\kappa_2 \cdot \pi \cdot d_{2в}}{q_2 \rho_2 \cdot c_2}; \quad z = \frac{\kappa_1 \cdot \pi \cdot d_{1в}}{q_2 \rho_2 \cdot c_2};$$

2.2. Изменение температуры перекачиваемой жидкости по длине основного трубопровода:

$$t_2 = m_2 + \left(1 + \frac{n_1}{\alpha}\right) M_1 e^{n_1 x} + \left(1 + \frac{n_2}{\alpha}\right) M_2 e^{n_2 x}, \qquad (2)$$

где $$m_2 = t_0 + \frac{z \cdot i_1}{\alpha \beta \cdot c_1} + \frac{i_2}{\beta \cdot c_2}$$

2.3. Дополнительные данные для прямотока

2.3.1. Постоянные коэффициенты M_1 и M_2 в уравнениях (I) и (2):

$$M_1 = \frac{i_1 c_1^{-1} - \alpha(t_{1н} - t_{2н}) - n_2 (t_{1н} - m_1)}{n_1 - n_2}, \qquad (3)$$

$$M_2 = \frac{\alpha(t_{1н} - t_{2н}) + n_1(t_{1н} - m_1) - i_1 c_1^{-1}}{n_1 - n_2} \qquad (4)$$

2.3.2. Коэффициенты n_1 и n_2 в уравнениях (I) и (2):

$$n = -0{,}5(\alpha + \beta + z) + \sqrt{0{,}25(\alpha + \beta + z)^2 - \alpha\beta}, \qquad (5)$$

$$n_2 = -0{,}5(a+b+z) - \sqrt{0{,}25(a+b+z)^2 - ab} \qquad (6)$$

2.3.3. Расстояние, при котором нагреваемая вязкая жидкость приобретает максимальное значение в случае перекачки ее по внутреннему трубопроводу, будет

$$x_{1M} = \frac{1}{n_1 - n_2} \ln\left[-\frac{n_2 M_2}{n_1 M_1}\right]. \qquad (7)$$

2.3.4. Значение максимальной температуры нагреваемой жидкости при перекачке ее по внутреннему трубопроводу:

$$t_{1M} = m_{1M} + M_1 e^{n_1 x_{1M}} + M_2 e^{n_2 x_{2M}} \qquad (8)$$

2.3.5. Расстояние, при котором нагреваемая вязкая жидкость приобретает максимальное значение в случае перекачки ее по межтрубному пространству, равно:

$$x_{2M} = \frac{1}{n_1 - n_2} \ln\left[-\frac{n_2(a+n_2)M_2}{n_1(a+n_1)M_1}\right] \qquad (9)$$

2.3.6. Максимальная температура нагреваемой жидкости при перекачке по межтрубному пространству:

$$t_{2M} = m_2 + \left(1+\frac{n_1}{a}\right) M_1 e^{n_1 x_{1M}} + \left(1+\frac{n_2}{a}\right) M_2 e^{n_2 x_{2M}} \qquad (10)$$

2.4. Дополнительные данные для противотока

2.4.1. Постоянные коэффициенты M_1 и M_2 в уравнениях (1) и (2):

$$M_1 = \frac{a(t_{2H} - m_2) - (a+n_2)(t_{1H} - m_1)\exp(n_2 L)}{(a+n_1)\exp(n_1 L) - (a+n_2)\exp(n_2 L)}, \qquad (11)$$

$$M_2 = \frac{(a+n_1)(t_{1H} - m_1)\exp(n_1 L) - a(t_{2H} - m_2)}{(a+n_1)\exp(n_1 L) - (a+n_2)\exp(n_2 L)} \qquad (12)$$

2.4.2. Коэффициенты n_1 и n_2 в уравнениях (1) и (2):

$$n_1 = 0{,}5(a-b-z) + \sqrt{0{,}25(a-b-z)^2 + ab}. \qquad (13)$$

$$n_2 = 0{,}5(a-b-z) - \sqrt{0{,}25(a-b-z)^2 + ab} \qquad (14)$$

2.4.3. Расстояние, при котором теплоноситель приобретает минимальную температуру в случае перекачки его по внутреннему

трубопроводу, определяется из уравнения (7), при этом значения M_I и M_2 берутся по уравнениям (II) и (I2), а значения n_1 и n_2 по уравнениям (I3) и (I4).

2.4.4. Максимальная температура теплоносителя в этом случае определяется по уравнению (8), в котором значения M_I и M_2 берутся по уравнениям (II) и (I2), а значения n_1 и n_2-по уравнениям (I3) и (I4).

2.4.5. Расстояние, при котором теплоноситель приобретает минимальную температуру в случае перекачки его по межтрубному пространству, определяется по уравнению (9), при этом значения M_I и M_2 берутся из уравнений (II) и (I2), а значения n_1 и n_2- по уравнениям (I3) и (I4).

2.4.6. Минимальная температура теплоносителя в этом случае определяется по уравнению (IO), в котором значения M_I и M_2 берутся по формулам (II) и (I2), а значения n_1 и n_2-по уравнениям (I3) и (I4).

2.4.7. Расстояние, при котором обе жидкости приобретают одинаковую температуру, определяется совместным решением уравнений (I) и (2). Значение этой температуры определяется подстановкой полученного значения X в одно из уравнений (I) или (2).

2.5. Коэффициент теплопередачи от жидкости, перекачиваемой по внутренней трубе через ее стенку, к жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству:

$$K=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1в}}+\frac{\sigma_{1в}}{2\lambda_{ст}}\ln\frac{d_{1н}}{d_{1в}}+\frac{d_{1в}}{d_{н}\alpha_{1н}}}, \qquad (I5)$$

2.6. Коэффициенты теплоотдачи от жидкости, перекачиваемой по внутренней трубе, к ее внутренней стенке

при ламинарном режиме течения:

$$\alpha_{1в}=0{,}17\frac{\lambda_1}{d_{1в}}Re_1^{0{,}33}Pr_1^{0{,}43}Gr_1^{0{,}1}\left(\frac{Pr_1}{Pr_{1ст}}\right)^{0{,}25}; \qquad (I6)$$

при турбулентном режиме течения:

$$\alpha_{1в}=0{,}021\frac{\lambda_1}{d_{1в}}Re_1^{0{,}8}\cdot Pr_1^{0{,}43}\left(\frac{Pr_2}{Pr_{1ст}}\right)^{0{,}25} \qquad (I7)$$

Здесь параметры $Re_1 = \frac{4Q_1}{\pi d_{1в} \cdot \nu_1}$,

$Pr_1 = \frac{\rho_1 c_1 \nu_1}{\lambda_1}$; $Pr_{1ст} = \rho_{1ст} \cdot c_{1ст} \frac{\nu_{1ст}}{\lambda_{1ст}}$; $Gr_1 = \frac{\beta_1 g d_{1в}^3 (t_1 - t_{ст})}{\nu_1^2}$

рассчитываются по параметрам жидкости, перекачиваемой по внутренней трубе при ее средней температуре $t_{1ср} = 0{,}5(t_{1н} + t_{1к})$ и при средней температуре стенки внутренней трубы, которая в начале расчета задается, а затем может быть уточнена по уравнению баланса тепла.

2.7. Коэффициенты теплоотдачи от наружной стенки внутреннего трубопровода к жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству

при ламинарном режиме течения:

$$\alpha_{1н} = 0{,}15 \frac{\lambda_2}{d_{1н}} \cdot Re_2^{0{,}33} Pr_2^{0{,}43} \cdot Gr_2^{0{,}1} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2ст}} \right)^{0{,}25}; \qquad (18)$$

при турбулентном режиме течения:

$$\alpha_{1н} = 0{,}021 \frac{\lambda_2}{d_н} \cdot Re_2^{0{,}8} Pr_2^{0{,}43} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2ст}} \right)^{0{,}25} \qquad (19)$$

Здесь параметры $Re_2 = \frac{4Q_2}{\pi \cdot \nu_2 (d_н + d_{2в})}$;

$Pr_2 = \rho_2 c_2 \frac{\nu_2}{\lambda_2}$; $Pr_{2ст} = \rho_{2ст} c_{2ст} \frac{\nu_{2ст}}{\lambda_{2ст}}$; $Gr_2 = \frac{\beta_2 g d_{1н}^3 (t_{1ст} - t_2)}{\nu_2^2}$

рассчитываются по параметрам жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству при ее средней температуре и средней температуре стенки внутренней трубы.

2.8. Коэффициент теплопередачи от жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству через стенку наружного трубопровода и тепловую изоляцию, в окружающий воздух:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2в}} + \frac{d_{2в}}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_{2н}}{d_{2в}} + \frac{d_{2в}}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_{2н}} \cdot \frac{d_{2в}}{\alpha_{из} d_{из}}} \qquad (20)$$

2.9. Коэффициент теплоотдачи от жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству, к внутренней стенке наружного трубопровода

при ламинарном режиме течения:

$$\alpha_{2в} = 0{,}17 \frac{\lambda_2}{d_{2в}} Re_2^{0{,}33} Pr_2^{0{,}43} Gr_2^{0{,}1} \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2ст}} \right)^{0{,}25}; \qquad (21)$$

при турбулентном режиме течения:

$$\alpha_{2б}=0{,}021\frac{\lambda_2}{d_{2б}}Re_2^{0{,}8}Pr_2^{0{,}43}\left(\frac{Pr}{Pr_{2cm}}\right)^{0{,}25} \qquad (22)$$

Здесь параметры $Re_2=\frac{4q_2}{\pi\cdot\nu_2(d_{1н}+d_{2б})}$;

$$Pr_2=\rho_2\,c_2\frac{\nu_2}{\lambda_2};\ Pr_{2cm}=\rho_{2cm}c_{2cm}\frac{\nu_{2cm}}{\lambda_{2cm}};\ Gr_2=\frac{\beta_2\cdot g\cdot d_{2б}^3\left(t_2-t_{2cm}\right)}{\nu_2^2}$$

рассчитываются по параметрам жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству, при средней температуре потока и средней температуре стенки наружной трубы.

2.9.I. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{из}$ от наружной поверхности тепловой изоляции в окружающий воздух:

$$\alpha_{из}=W_в\cdot\frac{\lambda_в}{d_{из}}\cdot Re_в^{n_в} \qquad (23)$$

Коэффициенты $W_в$ и $n_в$ определяются в зависимости от числа Рейнольдса, при этом теплопроводность $\lambda_в$ воздуха берется при средней температуре воздуха и стенки изоляции

$Re_в$	5–80	80–5 10^3	5 10^3 5 10^4	более 5 10^4
$W_в$	0,8I	0,625	0,97	0,023
$n_в$	0,4	0,46	0,6	0,8

2.I0. Подбор диаметров трубопроводов и производительности перекачки теплоносителя осуществляется следующим образом

2.I0.I. Зная производительность перекачки жидкости по внутренней трубе, если по ней будет перекачиваться вязкая нагреваемая жидкость, или задавшись производительностью теплоносителя (если по внутренней трубе будет перекачиваться теплоноситель) и скоростью движения жидкости, определяем диаметр внутреннего трубопровода:

$$d_{1в}=\sqrt{\frac{4q_1}{\pi U_1}} \qquad (24)$$

2.I0.2. Наружный диаметр внутреннего трубопровода:

$$d_{1н}=d_{1в}+2\delta, \qquad (25)$$

где δ – толщина стенки трубы.

2.I0.3. Внутренний диаметр наружного трубопровода

$$d_{2в} = \sqrt{\frac{4q_2}{\pi u_2} - d_{1н}^2}\,, \qquad (26)$$

2.II. Потери напора при движении жидкости по внутреннему трубопроводу

$$H_1 = 0{,}0246\,\frac{q_1^{1{,}75}\,\nu_{1в}^{0{,}25}\exp[-0{,}25A(m_1 - t_{1в})]}{d_{1в}^{4{,}75}}\cdot\varphi_{1(x)} + 4{,}155\,\frac{q_1\nu_{1в}\exp[-A_1(m_1 - t_{1в})]}{d_{1в}^4}\cdot\varphi_{2(x)}\,; \qquad (27)$$

где

$$\varphi_{1(x)} = \int_0^{x_{1кр}} \exp\left[-0{,}25A_1\left(M_1 e^{n_1 x} + M_2 e^{n_2 x}\right)\right]dx$$

$$\varphi_{2(x)} = \int_{x_{1кр}}^{L} \exp\left[-A_1\left(M_1 e^{n_1 x} + M_2 e^{n_2 x}\right)\right]dx$$

Значения M_1; M_2; n_1; n_2 берутся из выражений, соответствующих прямотоку или противотоку.

2.II.I. В уравнении (27) расстояние $x_{1кр}$, при котором турбулентный режим переходит в ламинарный, определяется по уравнению (I) методом последовательного приближения или графически. При этом критическая температура определяется по выражению:

$$t_{1кр} = t_a + \frac{1}{A_1}\ln\frac{580\,\pi\cdot d_{1в}\cdot\nu_a}{q_1}\,, \qquad (28)$$

где $\nu_a = \nu_{1в}\,e^{-A_1(t_a - t_{1в})}$ – вязкость при температуре окружающего трубопровод воздуха;

$\nu_{1в}$ – вязкость при температуре $t_{1в}$, выбранной в интервале вязкостно-температурной зависимости жидкости, перекачиваемой по внутреннему трубопроводу.

При $t_{1к} \geqslant t_{1кр}$ имеем турбулентный режим по всей длине трубопровода. Второй интеграл равен нулю, а в первом интеграле следует принимать $x_{1кр} \geqslant L$. При $t_{1кр} \geqslant t_{1н}$ имеем ламинарный режим по всей длине трубопровода.

В этом случае первый интеграл равен нулю, а во втором – следует принимать $X_{1кр} = 0$.

2.I2. Потери напора при движении жидкости по межтрубному пространству:

$$H_2 = 7{,}234 \cdot 10^{-3}(3{,}402 - \varepsilon)\frac{q_2^{1{,}75}\nu_{2в}^{0{,}25}\exp\left[-0{,}25A_2(m_2 - t_{2в})\right]}{(d_{2в}^2 - d_{1н}^2)^{1{,}75}(d_{2в} - d_{1н})^{1{,}25}}\varphi_{3(x)} +$$

$$+ 2{,}79(2{,}093 - \varepsilon)\frac{q_2\nu_{2в}\exp\left[-A_2(m_2 - t_{2в})\right]}{(d_{2в}^2 - d_{1н}^2)(d_{2в} - d_{1н})^2}\cdot\varphi_{4(x)}, \qquad (29)$$

где $\varphi_{3(x)} = \int_0^{X_{2кр}} \exp\left\{-0{,}25A_2\left[\left(1 + \frac{n_1}{a}\right)M_1 e^{n_1 x} + \left(1 + \frac{n_2}{a}\right)M_2 e^{n_2 x}\right]\right\} dx;$

$$\varphi_{4(x)} = \int_{X_{2кр}}^{L} \exp\left\{-A_2\left[\left(1 + \frac{n_1}{a}\right)M_1 e^{n_1 x} + \left(1 + \frac{n_2}{a}\right)M_2 e^{n_2 x}\right]\right\} dx;$$

$$\varepsilon = \frac{2e}{d_{2в} - d_{1н}}$$

При симметричном расположении трубопроводов $e = 0$.

2.I2.I. В уравнении (29) расстояние $X_{2кр}$, при котором турбулентный режим течения переходит в ламинарный, определяется по уравнению (2) методом последовательного приближения или графически. При этом критическая температура определяется по выражению:

$$t_{2кр} = t_0 + \frac{1}{A_2}\ln\frac{580\pi(d_{2в} + d_{1н})\nu_{2в}}{q_2} \qquad (30)$$

$\nu_{2в} = \nu_{2в}e^{-A_2(t_0 - t_{2в})}$ – вязкость при температуре окружающего воздуха;

$\nu_{2в}$ – вязкость при температуре $t_{2в}$, выбранной в интервале вязкостно-температурной зависимости жидкости, перекачиваемой по межтрубному пространству.

2.I3. Интегралы в уравнениях (27) и (29) решаются одним из методов численного интегрирования, например, методом трапеций.

2.I4. Если в расчетах потери напора окажутся больше допустимых по прочности трубопроводов, то расчеты повторяют при новых

значениях диаметров трубопроводов.

2.I5. Потери напора при движении жидкости по межтрубному пространству в случае противотока определяются по уравнению(29), где интеграл при определении $\varphi_{3(x)}$ берется от $\angle$ до $x_{2кр}$, а при определении $\varphi_{4(x)}$ интеграл берется от $x_{2кр}$ до нуля.

3. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКАЧКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ С ПУТЕВЫМ ПОДОГРЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ, ПЕРЕКАЧИВАЕМЫМ ПО ТРУБОПРОВОДУ, РАСПОЛОЖЕННЫМ СНАРУЖИ РЯДОМ С ОСНОВНЫМ В ОДНОЙ С НИМ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

3.I. Изменение температуры жидкости по длине трубопровода диаметром d_1, по которому перекачивается жидкость с производительностью q_1:

$$t_1 = m_1 + M_1 e^{n_1 x} + M_2 e^{n_2 x}, \qquad (3I)$$

где

$$a_1 = \frac{S_3 K_3}{\rho_1 c_1 q}; \quad b_1 = \frac{S_4 K_4}{q_1 \rho_1 c_1}; \quad a_2 = \frac{S_5 K_5}{q_2 \rho_2 c_2};$$

$$b_2 = \frac{S_7 K_7}{q_2 \rho_2 c_2}; \quad f_1 = \frac{S_4 K_4}{S_4 K_4 + S_5 K_5 + S_6 K_6};$$

$$f_2 = \frac{S_5 K_5}{S_4 K_4 + S_5 K_5 + S_6 K_6}; \quad f_3 = \frac{S_6 K_6}{S_4 K_4 + S_5 K_5 + S_6 K_6};$$

$$S_3 = \pi \cdot d_{1b} \frac{\gamma_1}{360}; \quad S_4 = \pi \cdot d_{1b} \left(1 - \frac{\gamma_1}{360}\right);$$

$$S_5 = \pi \cdot d_{2b} \cdot \frac{\gamma_2}{360}; \quad S_7 = \pi \cdot d_{2b} \left(1 - \frac{\gamma_2}{360}\right);$$

$$m_1 = \frac{b_1 f_2 i_2 c_2^{-1} + [b_2 + a_2 (f_1 + f_3)] i_1 c_1^{-1} + \{(b_2 + a_2 f_3) b_1 f_2 + [b_2 + a_2 (f_1 + f_3)](a_1 + b_1 f_3)\} t_0}{[b_2 + a_2 (f_1 + f_3)][a_1 + b_1 (f_2 + f_3)] - a_2 f_2 b_1 f_1}$$

3.2. Изменение температуры жидкости по длине трубопровода диаметром d_2, по которому перекачивается жидкость с производительностью q_2:

$$t_2 = m_2 + P_1 M_1 e^{n_1 x} + P_2 M_2 e^{n_2 x}, \qquad (32)$$

где

$$m_2 = \frac{m_1[a_1 + b_1(f_2+f_3)] - i_1 C_1^{-1} - (a_2 + b_1 f_3)\cdot\omega}{b_1 f_2};$$

$$P_1 = \frac{a_1 + b_1(f_2+f_3) + n_1}{b_1 f_2}; \quad P_2 = \frac{a_1 + b_1(f_2+f_3) + n_2}{b_1 f_2}$$

3.3. Дополнительные данные для прямотока.

3.3.I. Постоянные коэффициенты M_I, M_2 в уравнениях (3I) и (32):

$$M_1 = \frac{t_{2H} - m_2 - P_2(t_{1H} - m_1)}{P_1 - P_2}, \qquad (33)$$

$$M_2 = \frac{m_2 + P_1(t_{1H} - m_1) - t_{2H}}{P_1 - P_2} \qquad (34)$$

3.3.2. Коэффициенты n_1 и n_2 в уравнениях (3I) и (32)

$$n_1 = -D + \sqrt{D^2 - B}, \quad n_2 = -D - \sqrt{D^2 - B}, \qquad (35)$$

где

$$D = 0{,}5[a_1 + b_1(f_2 + f_3) + b_2 + a_2(f_1 + f_3)];$$

$$B = [b_2 + a_2(f_1 + f_3)][a_1 + b_1(f_2 + f_3)] - a_2 f_2 b_1 f_1$$

3.3.3. Расстояние, при котором нагреваемая вязкая жидкость приобретает максимальное значение в случае перекачки ее по трубопроводу диаметром d_1:

$$x_{1M} = \frac{\ln(-n_2 M_2) - \ln(n_1 M_1)}{n_1 - n_2} \qquad (36)$$

3.3.4. Значение максимальной температуры нагреваемой вязкой жидкости при перекачке ее по трубопроводу диаметром d_1:

$$t_{1M} = m_1 + M_1 e^{n_1 x_{1M}} + M_2 e^{n_2 x_{1M}} \qquad (37)$$

3.3.5. Расстояние, при котором нагреваемая вязкая жидкость приобретает максимальное значение в случае перекачки ее по трубопроводу диаметром d_2:

$$x_{2H} = \frac{\ln(-n_2 P_2 M_2) - \ln(n_1 P_1 M_1)}{n_1 - n_2} \qquad (38)$$

3.3.6. Максимальная температура нагреваемой вязкой жидкости при перекачке ее по трубопроводу диаметром d_2:

$$t_{2H} = m_2 + P_1 M_1 e^{n_1 x_{2M}} + P_2 M_2 e^{n_2 x_{2M}} \qquad (39)$$

3.4. Дополнительные данные для противотока

3.4.I. Постоянные коэффициенты M_1 и M_2 в уравнениях (3I) и (32):

$$M_1 = \frac{t_{2H} - m_2 - P_2(t_{1H} - m_1)\exp(n_2 L)}{P_1 \exp(n_1 L) - P_2 \exp(n_2 L)}, \qquad (40)$$

$$M_2 = \frac{m_2 + P_1(t_{1H} - m_1)\exp(n_1 L) - t_{2H}}{P_1 \exp(n_1 L) - P_2 \exp(n_2 L)} \qquad (41)$$

3.4.2. Коэффициенты n_1 и n_2 в уравнениях (3I) и (32):

$$n_1 = -D + \sqrt{D^2 + B}\ ; \quad n_2 = -D - \sqrt{D^2 + B}, \qquad (42)$$

где

$$D = 0{,}5\left[a_1 + b_1(f_2 + f_3) - b_2 - a_2(f_1 + f_3)\right];$$

$$B = \left[b_2 + a_2(f_1 + f_3)\right]\left[a_1 + b_1(f_2 + f_3)\right] - a_2 f_2 b_1 f_1$$

3.4.3. Расстояние x_{1H}, при котором теплоноситель принимает минимальную температуру в случае перекачки его по трубопроводу d_1, определяется по уравнению (36), при котором значения M_1, M_2, n_1 и n_2 берутся из уравнений (40), (4I) и (42) соответственно.

3.4.4. Минимальная температура теплоносителя при перекачке его по трубопроводу d_1 определяется по уравнению (7) при

соответствующем значении X_{1H} для противотока.

3.4.5. Расстояние X_{2H}, при котором теплоноситель принимает минимальную температуру в случае перекачки его по трубопроводу, d_2 определяется по уравнению (38), при этом значения M_I, M_2, n_1, n_2 берутся из выражений (40), (4I) и (42).

3.4.6. Минимальная температура теплоносителя при перекачке его по трубопроводу d_2 определяется по уравнению (39) при соответствующем значении X_{2M} для противотока.

3.4.7. Расстояние, где температура теплоносителя и нагреваемой вязкой жидкости принимает одинаковые значения, определяется совместным решением уравнений (3I) и (32).

Подставив затем полученное значение длины в одно из указанных уравнений, получают искомую температуру.

3.5. Коэффициент теплопередачи от жидкости в трубопроводе d_1 через его стенку и тепловую изоляцию в окружающий воздух:

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{d_{1B}} + \frac{d_{1B}}{2\lambda_{ст}} \ln\frac{d_{1H}}{d_{1B}} + \frac{d_{1B}}{d_{1из}\alpha_{1из}} \ln\frac{d_{1из}}{d_{1H}}} \qquad (43)$$

3.6. Коэффициент теплоотдачи α_{1B} от жидкости, перекачиваемой по трубопроводу d_1, и его внутренней стенке определяется по уравнениям (I6) или (I7) в зависимости от режима течения жидкости.

3.7. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{1из}$ от наружной поверхности тепловой изоляции трубопровода d_1 в окружающий воздух определяется по формуле (23), в которой в качестве характерного размера ставится $d_{1из}$.

3.8. Коэффициент теплопередачи от жидкости в трубопроводе d_1 через его стенку к воздуху, находящемуся между трубопроводами и тепловой изоляцией:

$$K_4 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1B}} + \frac{d_{1B}}{2\lambda_{ст}} \ln\frac{d_{1H}}{d_{1B}} + \frac{d_{1B}}{d_{1H}\alpha_{1HB}}} \qquad (44)$$

3.9. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{1нв}$ от наружной поверхности трубопровода d_1 к воздуху, находящемуся между трубопроводами и тепловой изоляцией:

$$\alpha_{1нв} = 0{,}5 \frac{\lambda_в}{d_{1н}} (Gr_в \cdot Pr_в)^{0{,}25}; \qquad (45)$$

где параметры $\lambda_в$, $Gr_в$, $Pr_в$ берутся при температуре воздуха $t_м$.

3.10. Коэффициент теплопередачи от жидкости в трубопроводе $\alpha_ж$ через его стенку в воздух, находящийся между трубопроводами и тепловой изоляцией:

$$K_5 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2в}} + \frac{d_{2в}}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_{2н}}{d_{2в}} + \frac{d_{2в}}{d_{2н}\alpha_{2нв}}} \qquad (46)$$

3.11. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{2в}$ определяется по формулам (16) или (17), в которых вместо диаметра $d_{1в}$ ставится значение диаметра $d_{2в}$.

3.12. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{2нв}$ от наружной поверхности трубопровода $d_{2в}$ в воздух, находящийся между трубопроводами и тепловой изоляцией, определяется по формуле:

$$\alpha_{2нв} = 0{,}6 \frac{\lambda_в}{d_{2н}} (Gr_в \cdot Pr_в)^{0{,}25}, \qquad (47)$$

где параметры $\lambda_в$; $Gr_в$ и $Pr_в$ берутся при температуре $t_м$.

3.13. Коэффициент теплопередачи от воздуха, находящегося между трубопроводами и тепловой изоляцией, через тепловую изоляцию в окружающую среду:

$$K_6 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вв}} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_{из}}} \qquad (48)$$

3.14. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{вв}$ от воздуха, находящегося между трубопроводами и тепловой изоляцией, к внутренней стенке тепловой изоляции:

$$\alpha_{вв} = 0{,}5 \frac{\lambda_в}{\delta_в} (Gr_в \cdot Pr_в)^{0{,}25}, \qquad (49)$$

где параметры $\lambda_в$; $Gr_в$ и $Pr_в$

берутся при температуре $t_м$.

3.I5. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{из}$ от наружной поверхности изоляции в окружающую среду

при

$$Re_в < 4\cdot 10^4;\quad \alpha_{из} = 0{,}66\frac{\lambda_в}{\delta_{из}}\cdot Re_в^{0{,}5}\cdot Pr_в^{0{,}43}\left(\frac{Pr_в}{Pr_{вст}}\right)^{0{,}25},$$

при

$$Re > 4\cdot 10^4;\quad \alpha_{из} = 0{,}037\frac{\lambda_в}{\delta_{из}}\cdot Re_в^{0{,}8}\cdot Pr^{0{,}43}\left(\frac{Pr_в}{Pr_{вст}}\right)^{0{,}25}, \qquad (50)$$

где параметры воздуха берутся при средней температуре воздуха.

3.I6. Коэффициент теплопередачи от жидкости в трубопроводе d_2 через его стенку и тепловую изоляцию в окружающую среду:

$$K_7 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2в}} + \frac{d_{2в}}{2\lambda_{ст}}\ln\frac{d_{2в}}{2\lambda_{из}}\ln\frac{d_{2из}}{d_{2н}} + \frac{d_{2в}}{d_{2из}\alpha_{2из}}} \qquad (5I)$$

3.I7. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{2из}$ от наружной поверхности тепловой изоляции трубопровода d_2 в окружающую среду определяется по формуле (23), где в качестве определяющего размера берется $d_{2из}$.

3.I8. Температура воздуха $t_м$, находящегося между трубопроводами и тепловой изоляцией, определяется по выражению:

$$t_м = f_1 t_1 + f_2 t_2 + f_3 t_3 \qquad (52)$$

3.I9. Падение напора при перекачке жидкости с производительностью q_1 по трубопроводу d_1 определяется по уравнению (27), где значения m_1, M_I, M_2, n_1 и n_2 берутся из выражений параграфа 3, соответствующих прямотоку или противотоку.

3.20. Падение напора при перекачке жидкости с производительностью q_2 по трубопроводу d_2 в случае прямотока:

$$H_2 = 0{,}0246\frac{q_2^{1{,}75}\nu_{2в}^{0{,}25}\exp[-0{,}25A_2(m_2 - t_2в)]}{d_{2в}^{4{,}75}}\cdot\varphi_{1(x)} + 4{,}155\frac{q_2\nu_{2в}\exp[-A_2(m_2 - t_2в)]}{d_{2в}^4}\cdot\varphi_{2(x)}, \qquad (53)$$

где

$$\varphi_{1(x)} = \int_{0}^{x_{кр}} \exp\left[-0{,}25 A_2 \left(\rho_1 M_1 e^{n_1 x} + \rho_2 M_2 e^{n_2 x}\right)\right] dx ;$$

$$\varphi_{2(x)} = \int_{x_{кр}}^{L} \exp\left[-A_2 \left(\rho_1 M_1 e^{n_1 x} + \rho_2 M_2 e^{n_2 x}\right)\right] dx$$

3.21. Падение напора при перекачке жидкости с производительностью q_2 по трубопроводу d_2 в случае противотока определяется по уравнению (53), где интеграл при определении $\varphi_{1(x)}$ берется от L до $x_{кр}$, а при определении $\varphi_{2(x)}$ интеграл берется от $x_{кр}$ до нуля.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА (произвольный)

4.I. Рассчитаем теплоизолированный трубопровод с путевым подогревом типа "труба в трубе" для перекачки нефти производительностью $Q_2 = 0{,}16I$ м^3/с . Длина трубопровода $L = 40000$ м. Внутренний трубопровод расположен соосно с основным трубопроводом. Для путевого подогрева принимаем теплоноситель - дизельное топливо.

Исходные данные для нефти следующие:

Плотность $\rho_{220} = 842$ кг/м^3

Кинематическая вязкость $\nu_{20} = 8{,}55 \cdot 10^{-5}$ м^2/с

Температура нефти в начале перекачки $T_{2н} = 343$ К

Температура застывания нефти $T_{2\,заст} = 298$ К

Температура нефти в конце перекачки $T_{2к} = 303$ К

Исходные данные для дизельного топлива:

Плотность $\rho_{120} = 878{,}7$ кг/м^3

Вязкость $\nu_{120} = 8{,}94 \cdot 10^{-6}$ м^2/с

Температура теплоносителя в начале перекачки $T_{1н} = 363$ К

Температура теплоносителя в конце перекачки $T_{1к} = 303$ К

Коэффициенты теплоемкости и теплопроводности рассчитываем по формулам Крего.

Данные о трубопроводах:

$d_{2н} = 0219$ м; $d_{2в} = 0{,}20I$ м; $d_{1н} = 0{,}108$ м; $d_1 = 0{,}1$ м;

$\delta_{из} = 0{,}05$ м; $d_{из} = 0{,}3I9$ м; $\lambda_{из} = 0{,}04$ Вт/м К; $\lambda_{ст} = 46{,}52$ Вт/м К

Температура воздуха $T_0 = 249$ К

Скорость ветра $U_в = 8$ м/с

$$A_I = 0{,}0275; \qquad A_2 = 0{,}0963$$

При расчете все физико-химические параметры нефти и теплоносителя берутся при средней их температуре (нефть $T_{2ср} = 323$ К; дизельное топливо $T_{1ср} = 333$ К).

Температура жидкости пристенного слоя принимаем на 2 градуса

ниже температуры потока.

4.2. Расход дизельного топлива по трубопроводу-спутнику:

$$q_1 = \frac{\pi \cdot d_{1в}^2}{4} \cdot U_1 = \frac{\pi \cdot 0{,}01^2}{4} \cdot 1 = 7{,}854 \cdot 10^{-5}\ м^3/с$$

4.3. Вязкости продуктов определяем по формуле Филонова-Рейнольдса:

$$\nu_I = 3 \cdot e^{-0{,}0275(T_I - 333)};$$

$$\nu_2 = 0{,}122\ e^{-0{,}0963(T_2 - 313)}$$

4.4. Определяем параметры Рейнольдса, Прандтля по формулам (16) и (19):

$$Re_{1п} = \frac{4\ 7{,}854\ 10^{3}}{\pi \cdot 0{,}1\ 3\ 10^{-6}} = 33333{,}41; \quad Re_{2п} = \frac{4\ 0{,}0161}{\pi (0{,}201 + 0{,}108)\ 4{,}657\ 10^{-6}} =$$

$$= 14245{,}28$$

$$Pr_{1п} = \frac{3\ 10^{-6}\ 2013{,}6\ 852}{0{,}15} = 34{,}312; \quad Pr_{2п} = \frac{4{,}657\ 10^{-6}\ 2019{,}7\ 821}{0{,}158} =$$

$$= 48{,}874$$

$$Pr_{1ст} = \frac{3{,}17\ 10^{-6}\ 2005{,}94\ \ 856{,}8}{0{,}15} = 36{,}322$$

$$Pr_{2ст} = \frac{5{,}647\ 10^{-6}\ 2012{,}3\ 822{,}6}{0{,}158} = 59{,}162$$

4.5. Определяем коэффициент теплоотдачи от дизельного топлива к внутренней стенке трубопровода-спутника по формуле (17):

$$\alpha_{1в} = 0{,}021\ \frac{0{,}15}{0{,}1}\ 33333{,}41^{0{,}8}\, 34{,}312^{0{,}43} \left(\frac{34{,}312}{36{,}322}\right)^{0{,}25} = 589{,}159\ Вт/м^2К$$

4.6. Коэффициент теплоотдачи от трубопровода-спутника к нефти:

$$\alpha_{1н} = 0{,}021 \frac{0{,}158}{0{,}108}\ 14245{,}28^{0{,}8}\ 48{,}814^{0{,}43} \left(\frac{48{,}814}{59{,}162}\right)^{0{,}25} = 328{,}059\ Вт/м^2К$$

4.7. Коэффициент теплоотдачи от дизельного топлива к нефти по формуле(I5):

$$K_I = \frac{I}{\frac{I}{589.759} + \frac{0,I}{2\ 46,52} \ln\frac{0,I08}{0,I} + \frac{0,I}{0,I08\ 328,059}} =$$

$$= 2I7,355 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

4.8. Коэффициент теплоотдачи от нефти к внутренней стенке трубопровода :

$$\alpha_{2l} = 0,02I\frac{0,I58}{0,20I}\ I4245,28^{0,8}\ 48,874^{0,43}\left(\frac{48,874}{59,I62}\right)^{0,25} =$$

$$= I76,27 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

4.9. Параметры воздуха:

$$\nu_{возд} = 3,262\ I0^{-9}\text{м}^2/\text{с};\quad Re_{2l} = \frac{8\ \ 0,3I9}{3,262\ \ I0^{-9}} = 7,823\ \ I0^8;$$

$$\lambda_{возд} = 0,0224 \text{ Вт/м К}$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной трубы в воздух по формуле (23) и табл. 1 :

$$\alpha_{2в} = 0,023\ \frac{0,0224}{0,3I9}\ (7,823\ I0^8)^{0,8} = 2I032,I5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

4.I0. Коэффициент теплоотдачи от нефти в воздух определяем по формуле (20):

$$K_2 = \frac{I}{\frac{I}{I76,27} + \frac{0,20I}{2\ 46,52} \ln\frac{0,2I9}{0,20I} + \frac{0,20I}{2\ 0,04} \ln\frac{0,3I9}{0,2I9} + \frac{0,20I}{0,3I9\ 2I932,I5}}$$

$$= I,052 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

4.II. Определяем коэффициенты α , β , Z по формуле (I):

$$a = \frac{2I7{,}355 \cdot \pi \cdot 0{,}I}{7{,}854\ I0^{-3} \cdot 8{,}52\ 20I3{,}6} = 5{,}068\ I0^{-3};$$

$$b = \frac{I{,}052 \cdot \pi \cdot 0{,}20I}{I{,}6I\ I0^{2}\ 82I\ 20I9{,}7} = 2{,}488\ I0^{-5};$$

$$z = \frac{2I7{,}355 \cdot \pi \cdot 0{,}I}{I{,}6I\ I0^{2}\ 82I\ 20I9{,}7} = 2{,}558\ I0^{-3}$$

4.I2. Определяем коэффициенты n_1 и n_2 по формуле (5) и (6):

$$n_1 = -0{,}5(5{,}068\ I0^{-3} + 2{,}488\ I0^{-5} + 2{,}588\ I0^{-3}) +$$
$$+ \sqrt{0{,}25(5{,}068\ I0^{-3} + 2{,}488\ I0^{-5} + 2{,}588\ I0^{-3})^2 - (5{,}068\ I0^{-3} \times 2{,}488\ I0^{-5})} = -3{,}8404 \cdot I0^{-3} + 3{,}824 \cdot 10^{-3} = -I{,}64\ I0^{-5};$$

$$n_2 = -3{,}8404\ I0^{-3} - 3{,}824\ I0^{-3} = -7{,}6644\ I0^{-3}.$$

4.I3. Задаемся гидравлическим уклоном $i_1 = 0{,}0I$ и $i_2 = 0{,}008$; определяем m_1 и m_2 по формуле (I) и (2):

$$m_1 = 249 + \frac{2{,}358\ I0^{-3} + 2{,}488\ I0^{-5}}{5{,}068\ I0^{-3}\ 2{,}488\ I0^{-5}\ 20I3{,}6}\ 0{,}0I + \frac{0{,}008}{2{,}488\ I0^{-5}\ 20I9{,}7} =$$

$$= 249{,}26I;$$

$$m = 249 + \frac{2{,}588\ I0^{-3}\ 0{,}0I}{5{,}068\ I0^{-3}\ 2{,}488\ I0^{-5}\ 20I3{,}6} + \frac{0{,}008}{2{,}488\ I0^{-5}\ 20I9{,}7} =$$

$$= 249{,}26I$$

4.I4. Постоянные коэффициенты M_1 и M_2 в уравнениях (I) и (2) по формулам (3) и (4):

$$M_1 = \frac{\frac{0{,}0I}{20I3{,}6} - 5{,}068\ I0^{-3}(363-343) + 7{,}6644\ I0^{-3}(363-249{,}26I)}{-I{,}64\ I0^{-5} + 7{,}6644\ I0^{-3}} = I00{,}73$$

$$M_2 = \frac{5{,}068\ I0^{-3}(363-343) - I{,}64\ I0^{-5}(363-249{,}26I) - \frac{0{,}0I}{20I3{,}6}}{-I{,}64\ I0^{-5} + 7{,}6644\ I0^{-3}}$$

$$= I3{,}009;$$

4.I5. Падение температуры теплоносителя по трубопроводу-спутнику:

$$T_I = 249{,}26I + I00{,}73e^{-I{,}64\ I0^{-5}x} + I3{,}009e^{-7{,}6644\ I0^{-3}x}$$

4.I6. Падение температуры нефти по межтрубному пространству

$$T_2 = 249{,}26I + \left(I - \frac{I64\ I0^{-5}}{5{,}068\cdot I0^{-3}}\right) I00{,}73e^{-I{,}64\ I0^{-5}x} + \left(I - \frac{7{,}6644\cdot I0^{-3}}{5{,}068\cdot I0^{-3}}\right)x$$

$$x\ I3{,}009e^{-7{,}6644\cdot I0^{-3}x} = 249{,}26I + I00{,}404e^{-I{,}64\ I0^{-5}x} -$$

$$- 6{,}665e^{-7{,}6644\cdot I0^{-3}x}.$$

4.I7. Расстояние, при котором нефть приобретает максимальную температуру, определяется по формуле (9)

$$x_{2м} = \frac{\ln\left[\frac{(-7{,}6644\cdot I0^{-3})(5{,}068\cdot I0^{-3} - 7{,}6644\cdot I0^{-3})I3{,}009}{(I{,}64\cdot I0^{-5})(5{,}068\cdot I0^{-3} - I{,}64\cdot I0^{-5})I00{,}73}\right]}{-I{,}64\cdot I0^{-5} + 7{,}6644\cdot I0^{-3}} = 449{,}095м$$

4.I8. Составляем таблицу I падения температур по длине трубопроводов

Таблица

$x_м$	0	400	449,95	500	I000	5000	I0000	I5000	30000	40000
T_1	363	349,94	349,86	349,45	348,36	342,06	334,75	328,02	3I0,85	30I,53
T_2	343	348,69	348,7I	348,7	348,03	34I,76	334,48	327,77	3I0,65	30I,36

4.I9. Вязкость теплоносителя при температуре **воздуха, окружающего трубопровод:**

$$\nu_c = 3\ I0^{-6}e^{-0{,}0275(249-333)} = 3{,}022\ I0^{-5}м^2/с$$

4.20. Критическая температура теплоносителя по формуле (28)

$$T_{1кр} = 249 + \frac{I}{0{,}02\,5}\ln\frac{580\cdot 0{,}I\ 3{,}022\cdot I0^{-5}}{7{,}854\cdot I0^{-3}} = 236{,}08\ К$$

Режим течения по трубопроводу-спутнику-турбулентный.

4.2I. Потери напора на трение по длине трубопровода-спутника

$$H_I = 0{,}0246\frac{(7{,}854\ 10^{-3})^{1{,}75}(3\ 10^{-6})^{0{,}25}e^{-0{,}25\ 0{,}0275(249{,}26I-333)}}{0{,}I^{4{,}75}}$$

$$\varphi_{1(x)} = \int_0^{40000} e^{-0{,}25\ 0{,}275(I00{,}73e^{-I{,}64\ I0^{-5}x)+I3{,}009e^{-7{,}6644\ I0^{-3}x)}}dx$$

интеграл $\varphi_{1(x)}$ решаем методом трапеций Таблица 3

$X_м$	$\varphi_{1(x)}$	$H_1(м)$
0	0	0
4000	I960,36	4I,59
8000	4095,534	86,89
I2000	63I7,504	I34,03
I6000	8623,958	I82,96
20000	II0I2,44	233,63
24000	I3480,4	285,99
28000	I6025,I9	339,979
32000	I8644,09	395,54
36000	2I334,36	452,6I5
40000	24093,24	5II,I46

4.22. Вязкость нефти при температуре **воздуха, окружающего трубопровод:**

$$\nu_{2a} = 0{,}I22\ I0^{-4}e^{-0{,}0963(249-3I3)} = 5{,}794\ I0^{-3}м^2/с$$

4.23. Критическая температура нефти перехода турбулентного режима в ламинарный по формуле (30):

$$T_{2кр} = 249 + \frac{I}{0{,}0963}Ln\frac{580\,\pi\cdot(0{,}20I+0{,}I08)5{,}794\ I0^{-3}}{I{,}6I\ I0^{-2}} = 304{,}I5К$$

Численным методом или графически определяем расстояние, на котором происходит переход турбулентного режима в ламинарный:

$$X_{2кр} = 36820\ м\ ;\quad T_2 = 304{,}I5\ К$$

4.24. Потери напора на трение по длине основного трубопровода по формуле (29):

$$H_T = 0{,}0246\,\frac{(1{,}61\ 10^{-2})^{1{,}75}\,(1{,}22\ 10^{-5})^{0{,}25}\,0{,}0963(249{,}261-313)}{(0{,}201^2-0{,}108^2)^{1{,}75}(0{,}201-0{,}108)^{1{,}25}}\ x$$

$$x\,\varphi_{3(x)} + 5{,}84\,\frac{1{,}61\ 10^{2}\ 1{,}22\ 10^{-5}e^{-0{,}0963(249{,}261-313)}}{(0{,}291^2-0{,}108^2)^{1{,}75}(0{,}201-0{,}108)^{2}}\cdot\varphi_{4(x)}$$

$$= \int_{0}^{36820} e^{\left[-0{,}0963(100{,}404e^{-1{,}64\ 10^{5}x}-6{,}665e^{-7{,}6644\ 10^{-3}x})\cdot 0{,}25\right]dx};$$

$$= \int_{36820}^{40000} e^{\left[-0{,}0963(100{,}404e^{-1{,}64\ 10^{-5}x}-6{,}665e^{-7{,}6644\ 10^{-3}x})\right]dx}$$

Потери напора при турбулентном режиме — Таблица 4

$x_м$	$\varphi_{3(x)}$	Нетур
0	0	0
3682	381,871	18,195
7364	787,129	37,504
11046	1248,272	59,475
14728	1763,076	84,009
18410	2353,065	112,114
22092	3003,515	143,105
25774	3723.457	177,408
29456	4515,597	215,15
33138	5382,314	256,445
368,20	6325,649	301,392

Потери напора при ламинарном режиме — Таблица 5

$x_м$	$\varphi_{4(x)}$	Нлам.
36620	0	0
37138	1,632	3,489
37456	3,309	7,073
37774	5,033	10,758
38092	6,804	14.544
38410	8,624	18,434

$H_м$	$\varphi_{ч}(x)$	$H_{лам.}$
38728	I0,493	22,429
39046	I2,4I3	26,534
39364	I4,385	30,749
39682	I6,409	35,075
40000	I8,487	39,5I7

4.25. Полные потери напора по длине трубопровода:

Н пол.= Нт + Нл = 30I,392 + 39,5I7 = 340,909 м

4.26. На полученные расчетные параметры температур теплоносителя и нефти в конце трубопроводов и потери напора на трение в трубах обеспечат нормальную перекачку нефти с путевым подогревом теплоносителем.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

М Е Т О Д И К А
РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКАЧКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ПО ТРУБОПРОВОДУ С ПУТЕВЫМ ПОДОГРЕВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

РД 39-I-II34-84

Издание ВНИИСПТнефти
450055, г.Уфа, пр.Октября,I44/3

Редактор Л.В.Батурина
Технический редактор Л.А.Кучерова

Подписано к печати II.I0.84 г. П03727
Формат 60х90/I6. Уч.-изд.л.I,5. Тираж I80 экз.
Заказ 185

Роталринт ВНИИСПТнефти

gost.e-ecolog.ru