МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВНИИСПТнефть

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОКЛАДКИ ИХ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

РД 39-30-1061-84

gost.e-ecolog.ru

1984

Министерство нефтяной промышленности

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СБОРУ, ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТУ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ
(ВНИИСПТнефть)

УТВЕРЖДЕН

Первым заместителем министра
нефтяной промышленности
В.И.Кремневым

II марта 1984 г.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

М Е Т О Д И К А
РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОКЛАДКИ ИХ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

РД 39-30-1061-84

1984

Методика предназначена для расчета трубопроводов, перекачивающих жидкости, подчиняющиеся реологической модели нелинейно-вязкопластичной, псевдопластичной, линейно-вязкопластичной и ньютоновской жидкостей. Методика охватывает области ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости в трубопроводе.

Базой для составления методики явились теоретические и экспериментальные исследования отдела трубопроводного транспорта ВНИИСПТнефть и литературные рекомендации.

Методика разработана к.т.н. Тонконогуровым Б.А.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Методика расчета нестационарных технологических режимов работы неизотермических теплоизолированных магистральных трубопроводов при различных способах прокладки их в районах распространения многолетнемерзлых грунтов

РД 39-30-1061-84

Вводится впервые

Приказом Министерства нефтяной промышленности от 13.06.84 г. № 360

срок введения с 01.08.84 г.

Срок действия до 01.08.89 г.

Настоящая методика предназначена для теплогидравлических расчетов нестационарных технологических режимов работы действующих и проектируемых трубопроводов.

Методика позволяет:

1. Определить критическую температуру перехода турбулентного режима движения жидкости в ламинарный.

2. Произвести тепловой и гидравлический расчеты пускового участка трубопровода.

3. Определить безопасное время остановки трубопровода.

4. Определить ореол протаивания грунтов вокруг трубопровода.

1. ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1.1. Индексы:

без - величина, характеризующая безопасность остановки перекачки;

в - величина относится к воздуху;

вк - величина относится к конвективному теплообмену;

в.о. - величина относится к теплообмену на границе грунт-воздух;

вр - величина относится к радиационному теплообмену;

гр - величина относится к грунту;

доп. - допустимая величина;

ест.о. - величина относится к окружающей среде;

ж - величина относится к жидкости;

зап. - величина, характеризующая заполнение трубопровода;

заст. - величина, характеризующая процесс застывания;

из - величина относится к изоляции;

к - конечное значение величины;

кп - величина относится к концу кристаллизации парафина;

кр - критическое значение величины, соответствующее условиям смены режима движения;

лам. - величина относится к ламинарному течению;

м - величина относится к мерзлому грунту;

н - начальное значение величины;

нп - величина относится к началу парафинизации;

ост. - величина относится к периоду остановки перекачки;

п - величина относится к поверхности;

сн - величина относится к снегу;

т - величина относится к талому грунту;

тр - величина относится к трубопроводу;

тур - величина относится к турбулентному режиму;

ч.т. - величина, характеризующая черноту поверхности;

эф - величина, относящаяся к эффективному показателю;

t - величина относится к нестационарным условиям;

∞ - величина относится к стационарным условиям;

х - величина берется при температуре T_x , при которой из нефти выделилось ε парафина (в частях единицы);

W - параметр взят при средней температуре стенки;

f - параметр взят при средней температуре потока;

$*$ - величина, характеризующая проявление неньютоновских свойств жидкости;

20 - величина берется при температуре 20°С;

I5 - величина берется при температуре I5°С;

I.2. Обозначения

а) техническая характеристика трубопровода:

D_1 - внутренний диаметр трубы, м;

R_1 - внутренний радиус трубы, м;

D_2 - наружный диаметр трубы, м;

R_2 - наружный радиус трубы, м;

$D_{из}$ - внешний диаметр трубопровода с учетом слоя теплоизоляции, м;

$R_{из}$ - внешний радиус трубопровода с учетом слоя теплоизоляции, м;

L - полная длина участка, м;

l - текущая длина участка, м;

h_0 - глубина заложения оси трубопровода, м;

h_ϕ - фиктивная глубина заложения, м;

h_n - глубина нейтрального слоя, ниже которой не сказывается сезонное изменение температуры воздуха, м;

$\varepsilon_{ч.т.}$ - приведенная степень черноты трубы;

б) тепловая и гидравлическая характеристика перекачиваемой жидкости:

Q - объемный расход, $м^3/с$;

W - скорость течения, м/с;

ρ - плотность, $кг/м^3$;

β - коэффициент объемного расширения, $1/°С$;

η - динамическая вязкость, $нс/м^2$;

ν - кинематическая вязкость, $м^2/с$;

$\dot{\gamma}$ - градиент скорости, $1/с$;

K - мера консистенции, $Н \cdot с^n/м^2$;

T - температура, ^oC;

τ_o - предельное напряжение сдвига, $Н/м^2$;

n - показатель поведения жидкости, $0 < n \leq 1$;

$П$ - общее содержание парафина в нефти (в частях единицы);

ε - количество парафина (в частях единицы), выпавшее из нефти в интервале температур $T_{f,нп} \div T_{f,кп}$;

χ - скрытая теплота кристаллизации парафина;

$\chi = (2{,}26 : 2{,}3)\ 10^5$, Дж/кг,

a' - коэффициент температуропроводности, $м^2/с$;

c - весовая теплоемкость, $Дж/кг^oC$;

λ - коэффициент теплопроводности, $Вт/м^oC$;

θ - безразмерная температура;

t - время;

$t_{без}$ - продолжительность безопасной остановки трубопровода;

α_1 - внутренний коэффициент теплоотдачи от жидкости к стенке, $Вт/м^2$ град;

H - потери напора на трение, м;

$Z_н = T_н - T_o$; $Z_к = T_к - T_o$; $Z_ж = T_ж - T_o$; $\Delta T = T_f - T_w$.

в) характеристика окружающей среды:

T_o - температура окружающей среды в ненарушенном тепловом состоянии в плоскости (горизонтальной) расположения оси трубопровода, град;

V - скорость ветра, м/с;

δ - толщина слоя, м;

α_2 - внешний коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы в окружающую среду, $Вт/м^2$ град;

K_t - коэффициент, учитывающий особенности теплового взаимодействия трубопровода с окружающей средой при пуске, Вт/м^2 град;

K_∞ - полный коэффициент теплопередачи при стационарном режиме, Вт/м^2 град;

$Q_ф$ - теплота фазовых переходов воды в грунте, Вт с/м^3;

r - радиус протаивания (промерзания): $r_в$ - верха, $r_н$ - низа, м;

$\alpha_{в.о}$ - обобщенный (с учетом радиационного баланса) коэффициент теплоотдачи от грунта в атмосферу, Вт/м^2 град;

$q_ф$ - удельная теплота плавления льда;

ω - естественная влажность грунта;

$\omega_{нз}$ - количество незамерзшей воды в грунте.

I.3. Константы

a - константа в формуле для коэффициента гидравлического сопротивления;

b - показатель степени в формуле для коэффициента гидравлического сопротивления;

B - константа в формуле для предельного напряжения сдвига, I/град;

$\tau_{o_н}$ - коэффициент в формуле для определения предельного напряжения сдвига, н/м^2;

u - показатель крутизны вискограммы (консистентограммы), I/град;

g - ускорение силы тяжести $g = 9{,}8I$ м/с^2;

Δr - поправка на неизотермичность по радиусу трубы;

Δe - поправка на неизотермичность по длине трубы;

$\beta_н$ - коэффициент в формуле для определения потерь напора при движении неньютоновской нефти, с^2/м;

C_S - постоянная Планка, $C_S = 5{,}7$ Вт/м^2 $^oK^4$.

P_i - приведенные числа Чебышева

$P_1 = 0{,}0838$; $P_2 = 0{,}3127$; $P_3 = 0{,}5$;

$P_4 = 0{,}6873$; $P_5 = 0{,}9163$

I.4. Параметры

Ньютоновская жидкость

$$Re = \frac{W \cdot D_1}{\nu}$$ - Число Рейнольдса;

$$P_r = \frac{\nu}{a'}$$ - параметр Прандтля;

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot D_1^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$$ - параметр Грасгофа;

Псевдопластичная жидкость

$$Re = \frac{D_1^n \cdot W^{2-n} \cdot \rho}{\frac{\kappa}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n}$$ - число Рейнольдса;

$$Re_* = \frac{D_1^n \cdot W^{2-n} \cdot \rho}{\frac{\kappa}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$ - обобщенный параметр Рейнольдса;

$$P_{r_*} = \frac{\kappa}{8\rho a'}\left(\frac{D_1}{W}\right)^{1-n} \cdot \left(\frac{6n+2}{n}\right)^n \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{(2n+1)(5n+3)}{(3n+1)^2}$$ - обобщенный параметр Прандтля;

$$Gr_* = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D_1^3 \cdot \rho^2}{\left[\frac{\kappa}{8}\left(\frac{D_1}{W}\right)^{1-n} \cdot \left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\right]^2} \cdot \left[\frac{3}{2} \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}\right]^2$$ - обобщенный параметр Грасгофа;

Бингамовская жидкость

$$И = \frac{\tau_0 \cdot D_1}{\eta \cdot W}$$ - параметр Ильюшина;

$$Re = \frac{W \cdot D_1 \cdot \rho}{\eta}$$ - число Рейнольдса;

$$Re = \frac{W \cdot D_1 \cdot \rho}{\eta}\left[\frac{8}{И+2(1+\sqrt{9+И})}\right]$$ – обобщенное число Рейнольдса;

$$Pr = \frac{\eta}{\alpha' \cdot \rho}$$ – число Прандтля;

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D_1^3 \cdot \rho^2}{\eta^2}$$ – параметр Грасгофа;

$$He = \frac{\tau_0 \cdot D_1^2 \cdot \rho}{\eta^2}$$ – параметр Хедстрема;

Нелинейно-вязкопластичная жидкость

$$И = \frac{\tau_0 \cdot D_1^n}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n \cdot W^n}$$ – параметр Ильюшина;

$$He = \frac{\tau_0^{\frac{2-n}{n}} \cdot D_1^2 \cdot \rho}{\left[\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\right]^{\frac{2}{n}}} \cdot \frac{3}{2}\,\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$ – критерий Хедстрема;

$$Re_* = \frac{D_1^n \cdot W^{2-n} \cdot \rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n}\left\{\frac{8}{И+\frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{Иn(3n+1)}{4}}\right]}\right\} \times$$ – обобщенный параметр Рейнольдса;

$$\times \frac{3}{2}\,\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)};$$

$$Pr_* = \frac{K}{54\rho\alpha'}\left(\frac{D_1}{W}\right)^{1-n}\cdot\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\cdot\left\{И+\frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{Иn(3n+1)}{4}}\right]\right\} \times$$ – обобщенный параметр Прандтля;

$$\times \frac{2}{3}\,\frac{(2n+1)(5n+3)}{(3n+1)^2}$$

$$Gr_* = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D_1^3 \cdot \rho}{\left[\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{D_1}{W}\right)^{1-n}\right]^2}\cdot\left\{\frac{8}{И+\frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{Иn(3n+1)}{4}}\right]}\right\}^2 \times$$ – обобщенный параметр Грасгофа

$$\times\left[\frac{3}{2}\,\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}\right]^2$$

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Исходные данные должны включать в себя:

I) Техническую характеристику трубопровода:

а) производительность перекачки - Q ;

б) внутренний и наружный диаметры трубопровода - D_1, D_2 ;

в) длину трубопровода - L ;

г) глубину заложения трубопровода, считая по оси - h_0 ;

д) материал и толщину изоляции - $\lambda_{из}$ и $\delta_{из}$;

е) начальную температуру жидкости - $T_н$;

ж) конечную температуру жидкости - $T_к$;

Величины по пунктам в и ж могут совместно не задаваться.

2) Характеристику перекачиваемой жидкости - зависимости плотности ρ , коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости C от температуры T ; зависимости меры консистенции K , показателя поведения жидкости n , вязкости η и предельного (динамического) напряжения сдвига τ_0 от температуры, температуру проявления неньютоновских свойств жидкости T_* , значение коэффициента объемного расширения.

3) Характеристику внешней среды:

а) сведения о распределении грунтов по трассе трубопровода;

б) данные о температуре, влажности, теплоемкости, теплоте фазовых переходов, объемном весе и коэффициенте теплопроводности грунтов на глубине заложения по месяцам года;

в) данные по срокам выпадения и толщина снегового покрова в районах прохождения трассы трубопровода.

Определение характеристики жидкости необходимо провести в лаборатории непосредственно на нефти (нефтепродукте), предназначенной для перекачки.

Значения τ_0, K, n, η, T_* определяются из реологических исследований.

Определение плотности производится в соответствии с действующим ГОСТом при температуре 20°С. Пересчет плотности на плотность при других температурах производится по формуле

$$\rho_T = \frac{\rho_{20}}{1+\beta(T-20)}, \qquad (I)$$

где β - коэффициент объемного расширения, величина которого выбирается в соответствии с табл. I (см. приложение).

Определение реологических свойств жидкости позволяет установить, к каким моделям следует отнести данную среду при различных температурах (ньютоновской, псевдопластичной, нелинейно-вязкопластичной или бингамовской модели жидкости). Зависимость напряжения от скорости сдвига приведена на рис. I. Обобщающей моделью всех этих кривых является модель Балкли-Гершеля

$$\tau = \tau_0 + K\cdot\dot{\gamma}^n, \qquad (2)$$

описывающая нелинейно-вязкопластичную жидкость.

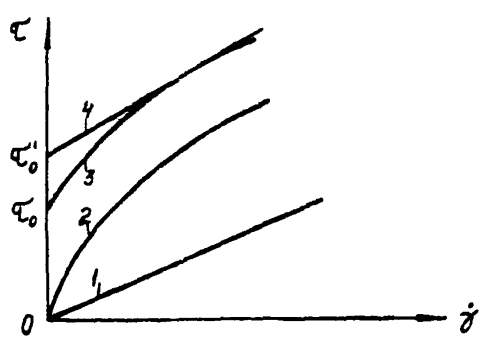

Рис. I Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для различных жидкостей:
I - ньютоновская; 2 - псевдопластичная; 3 - нелинейно-вязкопластичная; 4 - бингамовская.

При $n = 1$ уравнение (2) принимает вид:

$$\tau = \tau_0' + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad . \tag{3}$$

Это модель Шведова-Бингама, описывающая бингамовскую жидкость. При $\tau_0' = 0$ уравнение(2) описывает псевдопластичную жидкость

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^{n} \quad . \tag{4}$$

При $n = 1$ и $\tau_0 = 0$ уравнение (2) переходит в уравнение Ньютона для описания ньютоновских жидкостей

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad . \tag{5}$$

Определение меры консистентности K и показателя поведения жидкости n производится с помощью кривых $\tau - \dot{\gamma}$ для различных температур. При этом составляется система уравнений для одной кривой:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_0 + K(\dot{\gamma}_1)^{n} \quad ; \\ \tau_2 &= \tau_0 + K(\dot{\gamma}_2)^{n} \end{aligned} \tag{6}$$

и решается относительно K и n.

Значения градиентов скорости $\dot{\gamma}_1$ и $\dot{\gamma}_2$ выбирается в диапазоне режима работы трубопровода ($\dot{\gamma} = 8W/D_1$).

Зависимость предельного напряжения сдвига от температуры имеет вид:

$$\tau_0 = \tau_{0_H}\left(e^{-\beta T} - e^{-\beta T_H}\right) , \tag{7}$$

где τ_{0_H}, β – опытные коэффициенты для данной жидкости.

Параметр консистенции K с повышением температуры уменьшается ($K = A_K e^{-S_K \cdot T}$), приближаясь по численному значению к вязкости ньютоновской жидкости (при $T > T_H$).

Параметр n с повышением температуры до значения T_H – температуры проявления неньютоновских свойств жидкости возрастает ($n = A_n + S_n \cdot T$), приближаясь к единице.

Остальные реологические характеристики также определяются

в лабораторных условиях. Если такое определение по каким-либо причинам окажется невозможным, то часть характеристик можно рассчитать.

Весовая теплоемкость рассчитывается по формуле Крего /I/:

$$C = \frac{1{,}324 \cdot 10^5}{\sqrt{\rho_{15}}} (0{,}403 + 0{,}00081 \cdot T). \qquad (8)$$

Коэффициент теплопроводности также рассчитывается по формуле Крего /I/:

$$\lambda = \frac{117{,}5 \cdot 10^2}{\rho_{15}} (1 - 0{,}00054 \cdot T). \qquad (9)$$

Особенностью нелинейно-вязкопластичных нефтей и нефтепродуктов является высокое содержание парафина. Поэтому для них дополнительно необходимо иметь лабораторные данные о температуре начала и конца кристаллизации парафина $T_{нп}$ и $T_{кп}$, а также о количестве парафина в частях единицы ε, выпадающем при температуре $T_x < T_{нп}$.

Темп выделения $\varepsilon/(T_{нп} - T_x)$ можно приближенно оценить по следующему выражению:

$$\frac{\varepsilon}{T_{нп} - T_x} = \frac{\Pi}{T_{нп} - T_{кп}}. \qquad (10)$$

При ориентировочных расчетах интервал ($T_{нп} - T_{кп}$) можно принимать равным 40–50°С, а температуру $T_{нп}$ выбирать в пределах 40–50°С /3/. Содержание парафина в некоторых нефтях, по данным Ашумова, Павловой и др. /4/, /5/, /6/, представлено в табл. 2 (см. приложение).

Теплофизические свойства (коэффициенты теплопроводности и температуропроводности и теплоемкость) грунтов в мерзлом и талом состоянии являются важными параметрами при тепловом расчете

трубопровода. Необходимо определить теплофизические свойства грунтов непосредственно в полевых условиях на трассах трубопроводов. При этом методом статистической обработки более обоснованно выбрать значения их коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, определить длину расчетных участков трубопровода, на которых теплофизические свойства грунтов можно принять постоянными.

В качестве основного метода полевых определений теплофизических свойств вечномерзлых грунтов рекомендуется метод регулярного режима /7/.

При определении теплофизических свойств грунтов, не относящихся к категориям вечномерзлых, наиболее простым является зондовый.

При отсутствии возможности определения теплофизических свойств грунтов в полевых условиях необходимые параметры могут быть приняты по действующим СНиПам (СНиП II-18-76, СНиП II-А. 6-72 и др.) и справочникам по климату СССР .

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Переход от турбулентного режима течения жидкости в трубопроводе в ламинарный наступает при определенном числе Рейнольдса и критической температуре.

Для определения критической температуры рассчитывается обобщенное число Рейнольдса в рабочем диапазоне температур по формуле

$$Re_{*} = \frac{D_1^{n} \cdot W^{2-n} \cdot \rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^{n}} \cdot \frac{3}{2}\,\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}\, x^{*} \qquad (11)$$

$$\times \left\{ \frac{8}{И + \frac{8}{3n+1}\left[n + \sqrt{(2n+1)^2 + \frac{Hn(3n+1)}{4}}\right]} \right\}.$$

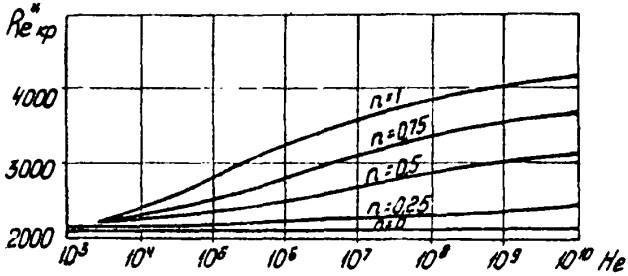

Рис.2 График зависимости значения критического обобщенного числа Рейнольдса от параметра Хедстрема и показателя поведения жидкости

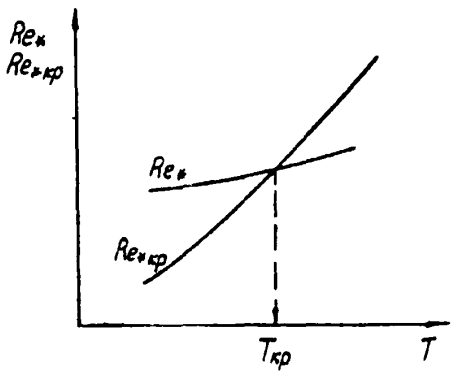

Рис.3 Определение критической температуры потока жидкости

и строится график зависимости обобщенного числа Рейнольдса от температуры ($Re_{*}-T$).

Затем по формуле

$$He = \frac{\tau_0^{\frac{2-n}{n}} \cdot \rho \cdot D_1^2}{\left[\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\right]^{\frac{2}{n}}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)} \qquad (12)$$

рассчитывается параметр Хедстрема в интервале температур, при которых перекачивается жидкость. При изменении параметра Хедстрема от 10^3 до 10^6 и показателя поведения жидкости от 0,25 до 1,0 значение критического обобщенного числа Рейнольдса можно определить по формуле /9/

$$Re_{*кр} = (2235 - 874n)He^{(0,075n - 0,013)} \qquad (13)$$

или по номограмме (рис. 2). Затем строится график зависимости $Re_{*кр}$ от температуры ($Re_{*кр}-T$) (рис. 3). Точка пересечения кривых $Re_{*}-T$ и $Re_{*кр}-T$ дает значение критической температуры.

Для маловязкой нефти критическая температура определяется по формуле

$$T_{кр} = T_i + \frac{1}{u} Ln \frac{Re_i}{Re_{кр}}, \qquad (14)$$

где T_i - температура, при которой известна вязкость η_i данной нефти, Re_i - значение Рейнольдса при температуре T_i , значение $Re_{кр}$ равное 2320.

4. ПУСК ТРУБОПРОВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

4.I. Тепловой расчет

Тепловой расчет при пуске трубопровода ставит своей задачей установить распределение средней по сечению температуры потока по длине трубопровода в зависимости от времени с начала его

заполнения.

Подземная прокладка

Изменение температуры жидкости в трубопроводе в период пуска и выхода на стационарный режим определяется по уравнению /10/:

$$T = T_{ест.о} + (T_н - T_{ест.о}) e^{-\frac{K_ср \pi D_1 l}{Qpc}} \left[1 - e^{-x(t - t_{зап})} \times \right. \quad (15)$$

$$\left. \times \left(1 - e^{-\frac{K_1 \cdot \pi D_1 l}{Qpc}}\right)\right] \cdot g(t) ,$$

где $g(t)$ - ступенчатая функция

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{, при } t < t_{зап.} \\ 1 & \text{, при } t \geq t_{зап.} \end{cases}$$

t - время работы трубопровода с момента начала заполнения;

$t_{зап.}$ - время заполнения участка трубопровода длиной l со средней скоростью W :

$$t_{зап} = l/W ;$$

$$x = \frac{40a'}{4h_o^2 - D_1^2}\left(1 + \frac{sh\, 2\alpha_o}{4\alpha_o}\right);$$

$$\alpha_o = \ln\left(\frac{2h_o}{D_1} + C_o\right);$$

$$C_o = \sqrt{\left(\frac{2h_o}{D_1}\right)^2 - 1} \quad .$$

При наличии снегового покрова его теплоизолирующее влияние учитывается введением в расчет вместо геометрической величины "фиктивной" глубины заложения :

$$h_{оф} = h_o + \frac{\lambda_{гр}}{\lambda_{сн}} \delta_{сн} , \quad (16)$$

где $\delta_{сн}$ - толщина снежного покрова.

Значения коэффициента теплопроводности снега ($\lambda_{сн}$) определяются по данным работы /12/ или приближенно принимаются для рыхлого снега - 0,23; для плотного - 0,58.

Величина коэффициента теплопередачи от жидкости в окружающую среду определяется по формуле:

$$K_\infty = \left(\frac{Ch\,\alpha_0}{\bar{\alpha}_1 \cdot C_0} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{C_0 \cdot \alpha_{в.о.}} \right)^{-1}, \qquad (17)$$

где $$\alpha_2 = 2\lambda_{гр} / D_1 \cdot \alpha_0 \; ; \qquad (18)$$

$$\bar{\alpha}_1 = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{D_1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{D_{из}}{D_2} \right)^{-1}; \qquad (19)$$

$$D_{из} = D_2 + 2\delta_{из}. \qquad (20)$$

Величина коэффициентов теплопроводности различных типов тепловой изоляции приведена в таблице /3/ (см. приложение).

Значение коэффициентов теплоотдачи от жидкости к внутренней стенке трубы определяется в зависимости от режима течения:

при ламинарном режиме

$$\alpha_1 = 0{,}17 \frac{\lambda_ж}{D_1} Re_{*f}^{0{,}33} \cdot Pr_{*f}^{0{,}43} \cdot Gr_{*f}^{0{,}1} \cdot \left(\frac{Pr_{*f}}{Pr_{*w}} \right)^{0{,}25}; \qquad (21)$$

при турбулентном режиме

$$\alpha_1 = 0{,}021 \frac{\lambda_ж}{D_1} Re_{*f}^{0{,}8} \cdot Pr_{*f}^{0{,}43} \cdot \left(\frac{Pr_{*f}}{Pr_{*w}} \right)^{0{,}25}. \qquad (22)$$

Здесь теплофизические характеристики определяются при средних температурах потока (T_f) и стенки трубы (T_w). Температура стенки трубы (T_w) находится методом последовательных приближений с проверкой по уравнению теплового баланса:

$$\alpha_1 D_1 (T_f - T_{гр}) = K_t D_{из} (T_{из} - T_{ест.о}). \qquad (23)$$

При ориентировочных расчетах для вычисления α_1 в период пуска нефтепровода можно принимать температуру стенки трубы на 5-10°С ниже средней температуры жидкости в области турбулентного

течения и на 10-15°С ниже в ламинарной области. В стационарных условиях перекачки $\bar{T}_w$ на 1-1,5°С ниже T_f в турбулентной области и на 3-4°С ниже в ламинарной области.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта в атмосферу включает значение коэффициентов конвективного ($\alpha_{вк}$) и радиационного теплообмена ($\alpha_{вр}$):

$$\alpha_{в.о.} = \alpha_{вк} + \alpha_{вр} . \qquad (24)$$

Конвективная составляющая определяется по формуле:

$$\alpha_{вк} = 11{,}6 + 7{,}0 \sqrt{V_в} . \qquad (25)$$

Значение коэффициента $\alpha_{вр}$ находится по формуле:

$$\alpha_{вр} = \frac{\varepsilon_{ч.т.} \cdot C_s}{T_п - T_в} \left[\left(\frac{T_п + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в + 273}{100} \right)^4 \right] . \qquad (26)$$

Численность значения величины приведенной степени черноты трубы в зависимости от материала и вида поверхности приведены в таблице 4 (см. приложение).

При практических расчетах допускается принимать $\alpha_{вр}$ порядка 4 Вт/м^2 град.

Коэффициент, учитывающий особенности теплового взаимодействия трубопровода с окружающей средой при пуске, определяется по зависимости:

$$K_t = 2{,}5\, K_\infty \cdot \alpha_2 \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{2}{C_o \cdot \alpha_{вр}} \right) . \qquad (27)$$

В результате падения температуры нефти, закачиваемой в нефтепровод, ее физические свойства изменяются по длине трубопровода. Вследствие этого в трубопроводе может быть несколько режимов течения. На рис. 4 представлен наиболее общий случай, встречающийся при транспорте высоковязких жидкостей.

На начальном участке трубопровода от температуры закачиваемой жидкости ($T_н$) до температуры начала проявления вязкоплас-

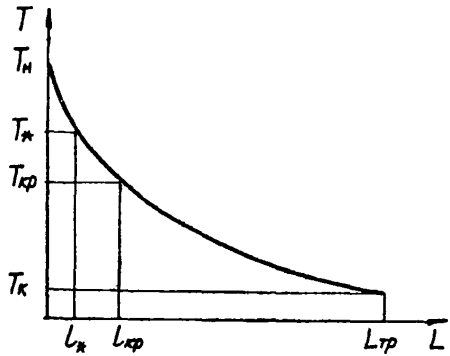

Рис.4 Изменение температуры жидкости по длине трубопровода

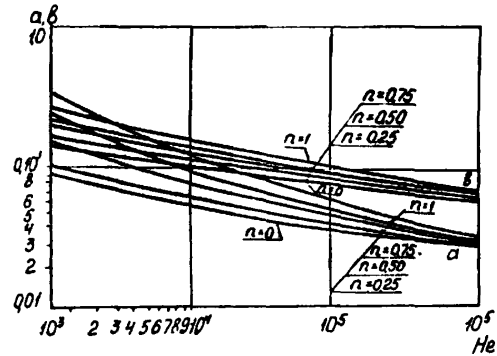

Рис. 5 Значения коэффициента α и показателя степени β в зависимости от параметра Хедстрема и показателя поведения жидкости

тичных свойств (T_*) наблюдается турбулентный режим ньютоновской жидкости.

Дальнейшее падение температуры до критических параметров потока ($T_* - T_{кр}$) происходит при турбулентном режиме неньютоновской жидкости.

И на конечном участке, от $T_{кр}$ до $T_к$, неньютоновская жидкость течет при ламинарном режиме.

Надземная прокладка

Значение температуры жидкости в сечении трубопровода на любой момент времени в период пуска и выхода на стационарный режим также определяется по формуле (I5). При этом параметры, входящие в эту формулу, имеют следующие значения:

$$K_\infty = \frac{\lambda_{нз}}{R_2}\left(\frac{Bi_1 \cdot Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2 \ln\frac{R_{нз}}{R_2}}\right), \qquad (28)$$

где Bi - критерий Био:

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 R_2}{\lambda_{нз}}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_{в.п.} \cdot R_{нз}}{\lambda_{нз}}; \quad Bi_1' = \frac{\alpha_1 \cdot \delta_{нз}}{\lambda_{нз}};$$

$$K_t = 2\alpha_1 \cdot M \cdot \delta_{нз}^2;$$

$$M = \frac{25}{N}\left[Bi_1'(3R_2 + 5R_{нз}) + 12(R_2 + R_{нз})\right];$$

$$N = \delta_{нз}^2\left[(Bi_1')^2(5R_2 + 11R_{нз}) + 10\,Bi_1'(3R_2 + 5R_{нз}) + 60(R_2 + R_{нз})\right];$$

$$X = \alpha_{нз} \cdot P;$$

$$P = \frac{10}{N}\left[(Bi_1')^2(4R_2 + R_{нз}) + 12\,Bi_1' \cdot R_2\right].$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубопровода в воздух рассчитывается по формуле (24). При этом в диапазоне изменения температур воздуха $-40^{\circ}C \leq T_в \leq +40^{\circ}C$ и $2 \cdot 10^5 > Re_в > 10^3$ конвективная составляющая определяется по формуле:

$$\alpha_{вк} = 0{,}221 \frac{\lambda_в}{D_{из}} \left(\frac{V_в \cdot D_{из}}{\nu_в} \right)^{0{,}6}. \qquad (29)$$

Характеристики сухого воздуха при давлении 0,0981 МПа приведены в таблице 5 (см. приложение).

Для трубопроводов, защищенных от воздействия ветра, коэффициент теплоотдачи $\alpha_{вк}$ определяется по формуле свободной конвекции:

$$\alpha_{вк} = 0{,}53 \frac{\lambda_в}{D_{из}} \left(G_r \cdot P_r \right)_в^{0{,}25}. \qquad (30)$$

Коэффициент теплоотдачи радиацией определяется по формуле (26), в которой принимается температура поверхности грунта, равная температуре поверхности изоляции.

При вынужденной конвекции можно приближенно принимать

$$\alpha_{в0} \approx \alpha_{вк}.$$

В общем случае допускается принимать $\alpha_{вр}$ в пределах 2÷5 Вт/м^2 град.

4.2. Гидравлический расчет

Потери напора на трение на участке трубопровода при любом режиме течения жидкости, подчиняющейся реологическому закону Балкли-Гершеля, определяются по следующей формуле /13/:

$$H_j = \beta_n \frac{Q^{2-2\beta+\beta n}}{5-4\beta+3\beta n} \cdot \left(\frac{K_n}{g} \right)^{\beta} \cdot l_j \cdot \Delta e_i^{\pm} \cdot \Delta r, \qquad (31)$$

где $$\beta_n = \frac{8a}{\pi^2 g} \left\{ \frac{(2n+1)(5n+3)}{(3n+1)^2} \cdot \frac{\pi^{n+2}}{192} \left[\frac{8(3n+1)}{\pi n} \right]^n \right\}^{\beta}, \qquad (32)$$

$\Delta_{\ell,t}$ – поправка на неизотермичность и нестационарность процесса в период пуска по длине трубопровода

Δr – поправка на неизотермичность по радиусу трубы в период пуска;

$$\Delta_{\ell,t} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{5} \left\{ C_1 \cdot C_3 (M_i - C_4) + C_5 \frac{N_i}{3n+1} \left[n + \sqrt{(2n+1)^2 + \frac{C_2 \cdot C_3}{C_5 \cdot N_i} (M_i - C_4)} \right] \right\}^8 .$$

Здесь

$$C_1 = \left[\frac{\pi^n}{8(3n+1)} \cdot \frac{D_1^3}{Q} \right]^n ;$$

$$C_2 = \frac{n^{n+1} \cdot (3n+1)^{1-n} \cdot \pi^n \cdot}{2^{3n-1}} \left(\frac{D_1^3}{Q} \right)^n ;$$

$$C_3 = \frac{\tau_{0*} \, e^{-B T_{ест.0}}}{K_*} ;$$

$$C_4 = e^{-B Z_*} ; \quad C_5 = e^{U Z_*} ;$$

$$N_i = e^{-U Z_H Q_i} ; \quad M_i = e^{-B Z_H Q_i} ;$$

$$\theta_i = \frac{T - T_{ест.0}}{T_H - T_{ест.0}} = e^{-\frac{K_\infty \pi D_1}{Q \rho c} P_i l_i} \left[1 - e^{-x\left(t - \frac{P_i l_i}{W}\right)} \times \left(1 - e^{-\frac{K_t \pi \cdot D_1}{Q \rho c} P_i l_i} \right) \right] ,$$

где P_i – приведенные числа Чебышева.

Поправка Δ_r рассчитывается по формулам (41),(43) или (46). При этом в ориентировочных расчетах температуру стенки (T_w) трубы в период пуска принимают на 10–15 °С ниже температуры потока (T_f).

Значения коэффициентов a и b, характеризующих режим течения жидкости, следует принимать следующими.

При ламинарном режиме течения нелинейно-вязкопластичной, бингамовской, псевдопластичной и ньютоновской жидкостей $a = 64$, $b = 1$.

При турбулентном режиме течения нелинейно-вязкопластичной жидкости эти коэффициенты определяются по формулам / 9 /:

$$a = (0{,}521 - 1{,}75n + 4{,}409n^2)He^{-(0{,}137 + 0{,}242n)}, \qquad (33)$$

$$b = (0{,}198 + 0{,}764n)He^{-(0{,}098 + 0{,}161n - 0{,}064n^2)}, \qquad (34)$$

или по рис.5.

Формулы (33) и (34) справедливы как для бингамовских, так и для псевдопластичных жидкостей. При этом для бингамовского пластика следует принимать $n = 1$, а для псевдопластика $He = 10^3$.

Для турбулентного режима течения ньютоновской жидкости

$a = 0{,}3164$, $b = 0{,}25$.

Полные потери напора на трение в трубопроводе составляются из потерь напора на трение на отдельных участках с соответствующим режимом течения.

В приложениях 2–4 приведены программы расчета пуска трубопроводов при подземной и надземной прокладках.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ БЕЗОПАСНОЙ ОСТАНОВКИ ТРУБОПРОВОДА

Под временем безопасной остановки трубопровода понимается время, после которого величина давления сдвига нефти не превышает допустимое давление на данном трубопроводе. Величина допустимого давления определяется либо располагаемым давлением насосной станции, либо прочностью трубы.

Максимальные потери на трение будут наблюдаться в момент пуска, когда весь трубопровод заполнен остывшей нефтью. Допустимая температура нефти в остановленном трубопроводе принимается на 3–5 градусов выше температуры застывания для предотвращения "замораживания" трубопровода.

5.1. Расчет времени остановки подземного трубопровода

Безопасное время остановки подземного трубопровода при охлаждении нефти от $T_н'$ до T определяется по выражению:

$$t_{без} \leq \frac{1}{\varphi_1} \ln\left[\left(\frac{\varphi_1-\varphi_2}{\psi_1+\varphi_2}\right)\left(\frac{T-T_0}{T_н'-T_0}\right)\right], \qquad (35)$$

где $$\psi_{1,2} = \frac{-(\psi_1+\psi_2+\chi) \pm \sqrt{(\psi_1+\psi_2+\chi)^2 - 4\psi_1\cdot\chi}}{2};$$

$$\psi_1 = \frac{2K_\infty}{cQR_1}; \quad \psi_2 = \psi_1\left(2{,}5 + \frac{5}{\alpha_0\cdot\alpha_{в.0}} \cdot \frac{\lambda_{гр}}{\sqrt{h_0^2 - R_1^2}}\right).$$

Остальные обозначения параметров и методы их определения приведены в разделе 4.1. При этом значение внутреннего коэффициента теплоотдачи, входящего в зависимость для K_∞, определяется следующим образом:

$$\alpha_{1\,ост} = S\frac{\lambda_ж}{D_1}(Gr_ж \cdot Pr_ж)^d, \qquad (36)$$

где коэффициенты S и d принимаются равными 1,18 и 0,13 при $10^{-3} \leq Gr_ж \cdot Pr_ж \leq 5 \cdot 10^{-3}$, 0,54 и 0,25 при $5 \cdot 10^{-3} < Gr_ж \cdot Pr_ж$

$\leq 2 \cdot 10^7$; 0,14 и 0,33 при $Gr_* \cdot Pr_* > 2 \cdot 10^7$.

5.2. Расчет времени остановки надземного трубопровода

Безопасное время остановки надземного теплоизолированного трубопровода при заданном перепаде температур $T_н' - T$ определяется по зависимости:

$$t_{без} \leq \frac{1}{\varphi_1} \ln\left[\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1 + x}\right)\left(\frac{T - T_в}{T_н' - T_в}\right)\right], \qquad (37)$$

где

$$\varphi_{12} = \frac{-(\psi_1 + \psi_2 + x) \pm \sqrt{(\psi_1 + \psi_2 + x)^2 - 4x \cdot \psi_1}}{2};$$

$$\psi_1 = \frac{2K_\infty}{cQR_1}; \quad \psi_2 = \frac{2}{\alpha_{1ост}} \psi_1 \cdot K_t .$$

Остальные параметры рассчитываются по формулам раздела 4.I.

5.3. Гидравлический расчет

Определение потерь напора на трение при возобновлении перекачки производится по формулам стационарного режима с учетом изменения температуры нефти и ее свойств в результате остывания. Расчет производится по режимным участкам, определенным в соответствии с расчетом критической температуры.

Гидравлический расчет трубопроводов, перекачивающих нелинейно-вязкопластичную жидкость, для всех режимов течения проводится по формуле /I3/:

$$H = \beta_* \frac{Q^{2-2\beta+\beta n}}{D_1^{5-4\beta+3\beta n}} \cdot \left(\frac{K_*}{Q}\right)^{\beta} \cdot L \cdot \Delta_e \cdot \Delta_r . \qquad (38)$$

Значения a, β, n и Q определяются при среднеарифметической температуре потока жидкости на рассматриваемом участке.

Ламинарный режим

Для ламинарного режима течения нелинейно-вязкопластичных

жидкостей $a = 64$, $b = 1$ и формула (38) с учетом (32) примет вид:

$$H = \frac{2^{3(n+1)} \cdot (2n+1)(5n+3)}{(\pi n)^n \cdot g \cdot 3\,(3n+1)^{2-n}} \cdot \frac{Q^n}{D_1^{3n+1}} \cdot \frac{K_*}{\rho} \cdot L \cdot \Delta_\ell \cdot \Delta_r \quad (39)$$

Поправку на неизотермичность по длине трубопровода в уравнении следует рассчитывать по следующей зависимости:

$$\Delta_\ell = \frac{e^{UZ_*}}{8\,Ш y_{л.м}} \left\{ И_0 \left[E_i(-BZ)_{Z_K}^{Z_H} - Ш y_{л.м}\, e^{-BZ_*} \right] + \right. \quad (40)$$

$$\left. + \frac{8}{3n+1} \left[n E_i(-UZ)_{Z_K}^{Z_H} + a_1 E_i(-b_1 Z)_{Z_K}^{Z_H} \right] \right.$$

Здесь E_i - интегральная показательная функция, значения которой приведены в /16/ :

$$E_i(-Z)_{Z_K}^{Z_H} = E_i(-Z_H) - E_i(-Z_K) \;;$$

$$a_1 = \sqrt{(2n+1)^2 + \frac{И_0\, n(3n+1)}{4}} \;;$$

$$b_1 = U + \frac{n(3n+1) И_0 (B-U)}{8 a_1^2} \;;$$

$$И_0 = \frac{8}{(6n+2)^n} i \left(\frac{D_1}{W} \right)^n \cdot \frac{\tau_0}{K} \Big|_{T = T_{тесто}} .$$

Показатель крутизны консистентограммы определяется по следующей зависимости:

$$U = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{K_1}{K_2} \;,$$

где K_1 и K_2 - значения меры консистенции, соответствующие температурам T_1 и T_2, входящим в рабочий интервал температур.

Предельное напряжение сдвига в зависимости от температуры определяется по формуле (7).

Поправка на неизотермичность по радиусу трубопровода определяется по формуле М.А.Михеева с учетом нелинейно-вязкопластичных свойств жидкости:

$$\Delta_r = \left(\frac{\eta_{эф}\cdot w}{\eta_{эф}\cdot f}\right)^{1/3}\left[1+0{,}22\left(\frac{Gr_*\cdot Pr_*}{Re_*}\right)^{0{,}15} f\right], \qquad (41)$$

где $\eta_{эф} = \frac{K}{64}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\left(\frac{D_1}{w}\right)^{1-n}\cdot\frac{2}{3}\,\frac{(2n+1)(5n+3)}{(3n+1)^2}\,\chi$

$$\chi\left\{И + \frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{Иn(3n+1)}{4}}\right]\right\}.$$

Индексы w и f обозначают, что реологические параметры принимаются при среднеарифметической температуре стенки и потока нефти по длине трубопровода:

$$T_w = 0{,}5(T_{Hw}+T_{Kw}); \quad T_f = 0{,}5(T_{Hf}+T_{Kf}).$$

Турбулентный режим

Для турбулентного режима течения нелинейно-вязкопластичных жидкостей в трубопроводе расчетными формулами являются зависимости (38) и (32).

Поправка на неизотермичность по длине трубопровода определяется:

$$\Delta_\ell = \frac{e^{BUz_*}}{g^B Ш y_{тур}}\left[f_1(Z_K)\right]^{B-1}\cdot\left\{\left[f_1(Z_K)-BZ_K\cdot f'(Z_K)\right]\ln\frac{Z_H}{Z_K}+Bf'(Z_K)\cdot(Z_H-Z_K)\right\}, \qquad (42)$$

где

$$f_1(Z_K) = \frac{И_0}{\varphi_1}\left(e^{-BZ_K}-e^{-BZ_H}\right)+\frac{8}{3n+1}\,e^{-UZ_K}\left\{n+\sqrt{(2n+1)^2+\right.$$

$$\left.+\frac{И_0 n(3n+1)}{4\varphi_1}\left[e^{-(B-U)Z_K}-e^{UZ_K}\cdot e^{-BZ_*}\right]}\right\};$$

$$f'(Z_K) = -\frac{И_0}{\varphi_1}Be^{-BZ_K}-\frac{8U}{3n+1}\,e^{-UZ_K}\left\{n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{n(3n+1)И_0}{4\varphi_1}}\,\chi\right.$$

$$\times\left[e^{-(B-U)z_к}-e^{Uz_к}\cdot e^{-Bz_*}\right]\Big\}-\frac{И_0 n\cdot\left[(B-U)e^{-Bz_к}+Ue^{-Bz_*}\right]}{\varphi_1\sqrt{(2n+1)^2+}}$$

$$+\frac{И_0 n(3n+1)}{4\varphi_1}\left[e^{-(B-U)z_к}-e^{Uz_к}\cdot e^{-Bz_*}\right];\quad \varphi_1=1-e^{-Bz_*}.$$

Поправку на неизотермичность по радиусу трубы при турбулентном течении нелинейно-вязкопластичных жидкостей следует определять по формуле М.А.Михеева с учетом нелинейно-вязкопластичных свойств жидкости:

$$\Delta_r=\left(\frac{\eta_{эф}\cdot w}{\eta_{эф}\cdot f}\right)^{1/3}. \qquad (43)$$

При перекачке подогретой нелинейно-вязкопластичной жидкости на начальных участках до момента значительного выделения парафина и проявления нелинейно-вязкопластичных свойств имеет место течение ньютоновской жидкости. Для этого участка имеем $a=0{,}3164$, $b=0{,}25$ (турбулентный режим течения в области действия закона Блазиуса) формула (38) с учетом (32) переходит в зависимость В.И.Черникина для ньютоновской жидкости:

$$H=\frac{0{,}241}{g}\cdot\frac{Q^{1{,}75}}{D_1^{4{,}75}}\nu^{0{,}25}\cdot L\cdot\Delta_e\cdot\Delta_r. \qquad (44)$$

Поправка на неизотермичность по длине трубопровода в формуле (44) рассчитывается по зависимости:

$$\Delta_e=\frac{e^{0{,}25Uz_н}}{Ш_{у\,тур.}}\left[Ei(-0{,}25Uz_н)-Ei(-0{,}25Uz_к)\right]. \qquad (45)$$

Поправка на неизотермичность по радиусу трубы в формуле (44) определяется следующим образом:

$$\Delta_r=\left(\nu_w/\nu_f\right)^{1/3}. \qquad (46)$$

5.4. Графоаналитический метод

Определение безопасного времени остановки трубопровода про-

водится следующим образом. Для остановленного участка трубопровода с определенным шагом (через 2-5°С) по температуре рассчитывается время остывания жидкости от начальной температуры, соответствующей моменту остановки, до конечной, принимаемой на 3-5 градусов выше температуры застывания жидкости. Затем строятся графики зависимости $T=f(t)$ для начального и конечного сечения трубопровода. Одновременно производится теплогидравлический расчет трубопровода с переменной начальной температурой в голове трубопровода, в результате чего определяются температура жидкости в конце участка и потери напора на трение на участке.

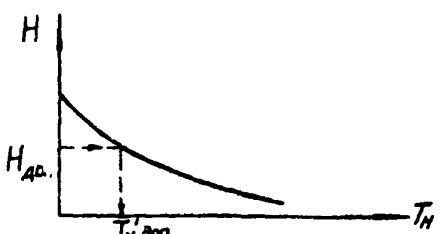

Рис. 6 Зависимость потерь напора на трение от начальной температуры жидкости

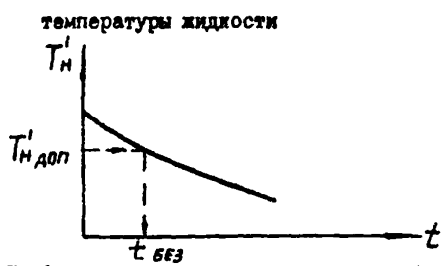

Рис.7 Остывание жидкости в начале трубопровода во времени

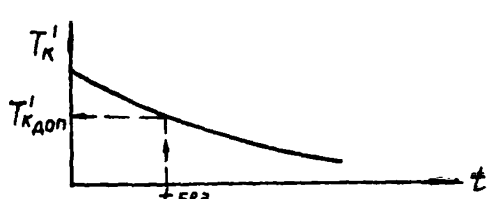

Рис. 8 Остывание жидкости в конце трубопровода во времени

Построив график $H=f(T'_н)$, откладывается допустимый напор с учетом возможности насосно-силового оборудования и несущей способности трубопровода и проводится параллельная оси абсцисс до пересечения с кривой (рис. 6). Точка пересечения дает значение температуры, до которой может застывать жидкость в начале трубопровода ($T'_{н\,доп}$). Затем на оси ординат графика $T'_н=f(t)$ (рис. 7) откладывается полученное значение $T'_{н\,доп}$ и проводится параллельная оси абсцисс до пересечения с кривой . Точка пересечения даст значение безопасного времени остановки трубопровода ($t_{без}$). По графику зависимости $T'_к=f(t)$ (рис.8), аналогично предыдущему, определяем по значению $t_{без}$ величину $T'_{к\,доп}$, соответствующую значению температуры жидкости на момент окончания остановки в конечном сечении трубопровода и сравниваем с величиной, полученной в теплогидравлическом расчете (при исходной $T_н=T'_{н\,доп}$) и величиной, соответствующей минимальной температуре остывания ($T_{min}=T_{зост}$ + 3-5 град). При удовлетворительной сходимости и непротиворечивости значений расчет считается законченным.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРЕОЛОВ ПРОТАИВАНИЯ ГРУНТОВ ВОКРУГ ТРУБОПРОВОДА И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Изменение температуры нефти в трубопроводе, проложенном в многолетнемерзлом грунте определяется по уравнению

$$T_к=T_{ест.о}+(T_н+T_{ест.о})\,e^{-\frac{K_{тр}\cdot\pi D_н l}{Q\rho_ж\cdot c_ж}} \quad . \qquad (47)$$

Для нахождения полного коэффициента теплопередачи $K_{тр}$ определяется динамика протаивания грунтового массива вокруг теплоизолированного трубопровода по формуле:

$$\tau=\frac{\rho}{4}\left\{\left[2\left(\frac{r}{R_{нз}}\right)\ln\frac{r}{R_{нз}}+(2n-1)\left[\left(\frac{r}{R_{нз}}\right)^2-1\right]+\right.\right.$$

$$+4Fe^{2m}\left\{Ei\left[2\left(\ln\frac{r}{R_{из}}-m\right)\right]-Ei(-2m)\right\}\Big|\Big\}\cdot \qquad (48)$$

а) Граница протаивания над трубой определяется выражением (48) при коэффициентах:

$$P_1=\frac{R_{из}^2\cdot\bar{Q}_{ф}}{\lambda_т\cdot T_{тр}-\lambda_м\cdot T_в};$$

$$m_в=\frac{\lambda_т T_{тр}\ln(h_0/R_{из})+\frac{\lambda_м\cdot\lambda_т}{\lambda_{из}}\cdot T_в\ln(R_{из}/R_2)}{\lambda_т T_{тр}-\lambda_м T_в}$$

$$n_в=m-\left(\ln\frac{h_0}{R_{из}}-\frac{\lambda_т}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_{из}}{R_2}\right);$$

$$F_в=m^2-\left(\ln\frac{h_0}{R_{из}}-\frac{\lambda_т}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_{из}}{R_2}\right)m-\frac{\lambda_т}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_{из}}{R_2}\ln\frac{h_0}{R_{из}}.$$

б) Граница протаивания под трубой, если на глубине $h_м$ $T_м<0$, определяется выражением (48) при коэффициентах:

$$P=\frac{R_{из}^2\bar{Q}_{ф}}{\lambda_т T_{тр}-\lambda_м\cdot T_м};$$

$$m_н=\frac{\lambda_т T_{тр}\ln\frac{h_м-h_0}{R_{из}}+\frac{\lambda_м\cdot\lambda_т}{\lambda_{из}}T_м\ln(R_{из}/R_2)}{\lambda_т T_{тр}-\lambda_м\cdot T_м}$$

$$n_н=m-\left(\ln\frac{h_м-h_0}{R_{из}}-\frac{\lambda_т}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_{из}}{R_2}\right);$$

$$F_н=mn-\frac{\lambda_т}{\lambda_{из}}\ln(R_{из}/R_2)\cdot\ln\frac{h_м-h_0}{R_{из}}.$$

в) Динамика протаивания под трубой в случае, если $T_м\simeq 0$ определяется по формуле (48) и коэффициентам:

$$P=\frac{R_{из}^2\cdot\bar{Q}_{ф}}{\lambda_т T_{тр}};\qquad m_н=\ln\frac{h_м-h_0}{R_{из}};$$

$$r_н = \frac{\lambda_т}{\lambda_{нз}} \ln \frac{R_{нз}}{R_2}; \qquad F_н = 0.$$

Величина предельной границы оттаивания для случаев $а$ и $б$ определяется из условия

$$r_в \longrightarrow R_{нз} e^{m_в}, \qquad r_н \longrightarrow R_{нз} e^{m_н};$$

в случае $б$

$$R_2 \longrightarrow \infty$$

Определив радиусы протаивания, находим изменение температуры жидкости при наличии такой зоны вокруг трубопровода по зависимости (47), где

$$K_{тр} = \frac{\lambda_т \cdot \lambda_{нз}}{r_в \left(\lambda_{нз} \ln \frac{r_в}{R_{нз}} + \lambda_т \ln \frac{R_{нз}}{R_2}\right)} +$$

$$+ \frac{\lambda_т \lambda_{нз}}{r_н \left(\lambda_{нз} \frac{r_н}{R_{нз}} + \lambda_т \frac{R_{нз}}{R_2}\right)};$$

$$\bar{Q}_ф = q_ф \cdot \rho_{тр} (\omega - \omega_{н.з.}).$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I. Кусаков М.М. Методы определения физико-химических ха - рактеристик нефтяных продуктов. М-Л., ОНТИ, НКТП, СССР, I936.

2. Черникин В.И. Перекачка вязких и застывающих нефтей. М., Гостоптехиздат, I959.

3. Нежевенко В.Ф., Кедрова Р.И. Состав твердых парафинов нефтей Куйбышевской области. В сб. Борьба с отложениями парафина. М., Недра, I965.

4. Ашумов Г.Г. Азербайджанские нефти. Баку, АН АзССР,I96I.

5. Павлова С.Н. и др. Нефти восточных районов СССР. М., Гостоптехиздат, I962.

6. Павлова С.Н. и др. Новые нефти восточных районов СССР. М., Химия, I967.

7. Методика исследования взаимодействия трубопроводов с окружающей средой на опытных участках трубопроводов. ОНТИ ВНИИСТа, М., I973.

8. Губин В.Е., Тонконогов Б.А. Критические параметры по - тока при течении нелинейно-вязкопластичных нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам. Труды ВНИИСПТнефть, вып. I2. Уфа, I975.

9. Гостев Н.М. Гидравлический расчет трубопроводов при изотермической перекачке ньютоновских жидкостей. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. Труды ВНИИСПТнефть. Уфа, I980

I0. Тугунов П.М., Тонконогов Б.А., Гостев Н.М., Кацнельсон Т.Е., Александрова С.Н. Тепловой режим пуска подземного теплоизолированного трубопровода с учетом влияния температурного поля грунта. Изв. ВУЗов "Нефть и газ", № I0, I983 г.

II. Яблонский В.С., Белоусов В.Д. Проектирование нефтегазопроводов. М., Гостоптехиздат, I959.

I2. Велли Ю.Я., Докучаев В.И., Федоров Н.Ф. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Л., Стройиздат. 1977.

I3. Тонконогов Б.А., Шутов А.А., Мироненко Н.Я., Гостев Н.М., Стародубцева Р.А. Гидравлические параметры неизотермических трубопроводов при перекачке неньютоновских нефтей. Труды ВНИИСПТнефть, вып. I8, 1977, с. 30-45.

I4. Тугунов П.И., Новоселов В.Ф. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. М., Недра, 1981.

I5. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы. М., Физматгиз, 1962.

I6. Таблицы интегральной показательной функции. АН СССР. М., 1954.

I7. Спиридонов В.В., Семенов Л.П., Пуриков А.С. Определение ореолов протаивания и промерзания грунтов вокруг теплоизолированного трубопровода в зависимости от времени. М., Труды ВНИИСТа, вып. 35, 1976, с. 9-I2.

I8. Щербакова Р.П., Сопова И.В. Применение пенополиуретанов для теплоизоляции трубопроводов. Обзоры зарубежной литературы. Сер. транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М., ВНИИОЭНГ, 1976.

Приложение 1

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица I

Коэффициенты объемного расширения в зависимости от плотности при 20°С

Плотность ρ, кг/м^3	β, 1/°С	Плотность ρ, кг/м^3	β, 1/°С
700-720	0,001255	860-880	0,000782
720-740	0,001183	880-900	0,000734
740-760	0,001118	900-920	0,000688
760-780	0,001054	920-940	0,000645
780-800	0,000995	940-960	0,000604
800-820	0,000937	960-980	0,000564
820-840	0,000882	980-1000	0,000526
840-860	0,000831		

Таблица 2

Содержание парафина в некоторых нефтях

Название нефти	П, %	Название нефти	П, %
Андиканская	4-10	Мухановская	7-8
Арланская	3,0	Нефть о.Песчаный	14,7
Битковская	13,6	Озек-Суатская	17-26
Бориславская	10,0	Окаремская	16,2
Величаевская	20,2	Ромашкинская	4-8
Гашинская	14,8	Ромашкинская	5,0
Горская	10,5	Сользаводская	13,4
Гоусановская	6,3	Сухокумская	17,7

1	2	3	4
Кетыбайская	10-20	Туймазинская (девон)	3-3,5
Мирновская	4,6	Узеньская	25-30
Котур-Теплинская	6,2	Хадыженская (тяжелая)	6,6
Кумдагская	18-20	Чекмагушская	4,5
Карачухурская	5-6	Москудинская	3,4
Минусинская	22	Красноярская (Оренбург. обл.)	4,4

Таблица 3

Коэффициент теплопроводности некоторых теплоизоляционных материалов

Название материала	Коэффициент теплопроводности, λ Вт/м.град
Пенополиуретан	0,16
Пенополистирол	0,03
Стекловолокно	0,033
Пробка	0,043
Пеностекло	0,05
Перлит	0,07
ПСФ-ВНИИСТ	0,052

Таблица 4

Значения приведенной степени черноты поверхности трубы

Материал и вид поверхности	Приведенная степень черноты
Алюминий шероховатый	- 0,55
Железо Шероховатое	- 0,242
Железо литое необработанное	- 0,87 + 0,95
Сталь окисленная шероховатая	- 0,94 + 0,97

Таблица 5

Теплофизические характеристики воздуха

Абсолютная температура, К	Плотность, ρ кг/м^3	Коэффициент теплопровод λ Вт/м.град	Кинематическая вязкость, ν 10^6 (м^2/с)	Параметр Прандтля
223	I,584	0,0204	0,256	0,728
233	I,515	0,0212	0,279	0,728
243	I,453	0,0220	0,300	0,723
253	I,395	0,0228	0,345	0,716
263	I,342	0,0236	0,355	0,712
273	I,293	0,0244	0,369	0,707
283	I,247	0,025I	0,393	0,705
293	I,205	0,0259	0,4I8	0,703
303	I,I65	0,0267	0,444	0,70I
313	I,I28	0,0276	0,47I	0,699
323	I,093	0,0283	0,499	0,698

Таблица 6

Расчетные значения теплофизических характеристик талых и мерзлых грунтов

Объемная масса т/м^3	Суммарная влажность грунта, доли единицы	Коэффициент теплопроводности Вт/м·град: пески		супеси		суглинки и глины		Объемная теплоемкость, Дж/м^3·град	
		$\lambda_т$	$\lambda_м$	$\lambda_т$	$\lambda_м$	$\lambda_т$	$\lambda_м$	$C_т$	$C_м$
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
I,2	0,05	0,46	0,60	-	-	-	-	II90	I090
I,2	0,I0	0,72	0,92	0,44	0,52	-	-	I340	II30
I,4	0,05	0,66	0,80	-	-	-	-	I380	I260
I,4	0,I0	I,0I	I,25	0,60	0,80	0,5I	0,79	I550	I320

I	1 2	1 3	1 4	1 5	1 6	1 7	1 8	1 9	1 10
I,4	0,I5	I,I6	I,45	0,82	I,02	0,65	0,97	I720	I380
I,4	0,20	-	-	0,97	I,22	0,75	I,09	I690	I450
I,4	0,25	-	-	I,07	I,35	0,83	I,I6	2060	I5I0
I,6	0,05	0,87	I,06	-	-	-	-	I590	I430
I,6	0,I0	I,22	I,57	-	-	-	-	I800	I5I0
I,6	0,I5	I,45	I,86	I,08	I,28	0,83	I,I4	I970	I550
I,6	0,20	I,58	2,0I	I,22	I,50	I,02	I,30	2I80	I660
I,6	0,25	I,64	2,II	I,35	I,67	I,II	I,44	2370	I720
I,6	0,30	-	2,24	I,39	I,80	I,I6	I,5I	2560	I800
I,6	0,35	-	-	I,5I	I,9I	I,22	I,57	2730	I870
I,6	0,40	-	-	-	2,00	I,28	I,64	2940	I950
I,6	0,60	-	-	-	-	-	I,74	-	2I00
I,8	0,I0	I,5I	I,86	-	-	-	-	20I0	I680
I,8	0,I5	I,80	2,20	I,38	I,52	I,I6	I,43	2220	I760
8	0,20	I,9I	2,44	I,55	I,76	I,30	I,60	2430	I850
I,8	0,25	2,03	2,59	I,66	I,97	I,44	I,77	2690	I930
I,8	0,30	-	2,69	I,72	2,II	I,48	I,87	2900	20I0
I,8	0,35	-	-	I,75	2,24	I,54	I,93	3I00	2I00
I,8	0,40	-	-	-	2,32	I,62	2,00	3340	2I80
I,8	0,60	-	-	-	-	-	2,09	-	2350
2,0	0,I5	2,04	2,55	I,62	I,74	-	-	2480	I970
2,0	0,20	2,32	2,8I	I,8I	2,03	I,44	-	2480	2060
2,0	0,25	2,62	3,I6	2,0I	2,24	I,57	I,9I	2960	2I40
2,0	0,30	-	-	2,09	2,44	I,67	2,03	3230	2220
2,0	0,35	-	-	-	-	I,77	2,I6	3440	2330

Приложение 2

Программа BODEN

```
C*****************************************************
C*            ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ              *
C*                ПУСКА ТРУБОПРОВОДА                  *
C*             ( ПОДЗЕМНАЯ ПРОКЛАДКА )                *
C*****************************************************
      IMPLICIT REAL(K,L)
      REAL M
      COMMON D1,AK,UK,W,Y,RCF
      COMMON /C/R,T0,SHY,ACRP,X,A,YC,P
      COMMON /E/ARO,BRO,TN,TF,AN,SN,AC,BC,CP,AL,BL,LNF,TBP
      COMMON /F1/CF,AKF,ULF,REOF,PRF,PRN,TAYBF,TAY01,B,ANNF
      DIMENSION D11(6),D21(6),H01(6),TN1(10),LTR1(10),LGR1(5),H(3)
      DIMENSION LIZ1(5),BIZ1(10),AGR1(5),T01(12)
      DIMENSION CI(10),Y1(50),P(5),CP(3)
      READ 110,ID,ITN,IL,ILG,ILI,IB,IA,ITB,IG,IY
      READ 111,(H01(I),I=1,IC)
      READ 111,(D11(I),I=1,IC)
      READ 111,(D21(I),I=1,IC)
      READ 119,(TN1(I),I=1,ITN)
      READ 113,(LTR1(I),I=1,IL)
      READ 114,(LGR1(I),I=1,ILG)
      READ 114,(LIZ1(I),I=1,ILI)
      READ 116,(BIZ1(I),I=1,IB)
      READ 117,(AGR1(I),I=1,IA)
      READ 118,(T01(I),I=1,ITB)
      READ 119,(CI(I),I=1,IG)
      READ 120,(Y1(I),I=1,IY)
      READ 122,TTBP
      READ 121,SK,AK,US,UK
      READ 122,ARO,ROS,BRO
      READ 123,AL,BL
      READ 124,AC,BC,CP
      READ 125,TAY01,B
      READ 126,AVO,BT
      READ 127,AN,SN
      READ 130,LST
      READ 128,FF,XX
      PRINT 887
      PRINT 100,AC,BC,AL,BL,ARO,BRO,SK,LS,AK,UK
      PRINT 101,AN,SN,TAY01,B,TTBP,E
      PRINT 102,BT,TTBP,CP
      P(1)=.08375
      P(2)=.31273
      P(3)=.5
      P(4)=.68727
      P(5)=.91625
      DO 50 INC=1,IC
      D1=D11(IND)
      D2=D21(IND)
      H0=H01(IND)
      DO 51 INC=1,IC
      C=CI(INC)
      DO 52 INT=1,ITB
      T0=T01(INT)
      DO 53 INL=1,ILG
      LGR=LGR1(INL)
```

```
      DO 54 INP=1,IL
      LLYR=LTR1(INR)
      DO 55 INZ=1,ILI
      LIZ=LIZ1(INZ)
      DO 56 INP=1,IB
      BIZ=BIZ1(INB)
      DO 57 INR1=1,IA
      ACR=ACR1(INR1)
      DO 58 INN=1,ITN
      TN=TN1(INN)
      A1=D1**2
      W=42.1258*G/(ROS*A1)
      Q=3.14158*W*A1/4.
    СПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
      TBP=TTBP
      T=TBP
    1 T=T-0.1
      AKT=AK*EXP(-UK*T)
      ANT=AN+SN*T
      RT=ARO-BRO*T
      TAYT=TAYP1*(EXP(-B*T)*EXP(-B*TBP))
      A2=((6.*ANT+2.)/ANT)**ANT
      A3=3.*ANT+1.
      A4=2.*ANT+1.
      A5=5.*ANT+3.
      UL=TAYT*D1**ANT/(AKT/8.*A2*W**ANT)
      A6=D1**ANT*W**(2.-ANT)*RT/(AKT/8.*A2)
      A7=1.5*A3**2/(A4*A5)
      A8=A6*A7
      A9=SQRT(A4**2+(UL*ANT*A3/8.))
      A10=8./(UL+8./A3*(ANT+A9))
      REO=A8*A10
      HE=TAYT**((2.-ANT)/ANT)*D1**2*RT*A7/(AKT/8.*A2)**(2./ANT)
      REOKR=(2235.-874.*ANT)*HE**(0.075*ANT-0.015)
      IF (REO-REOKR.GT.50.) GO TO 1
      TKP=T
      PRINT 105
      DN=D2+2.*BIZ
      R1=D1/2.
      C01=SQRT((2.*H0/D1)**2-1.)
      ALFA0=ALOG(2.*H0/D1*C01)
      ALFA2=2.*LCR/(D1*ALFA0)
      A2=SINH(2.*ALFA0)
      ACRP=10.*ACR*(1.*A2/(4.*ALFA0))/(H0**2-R1**2)
      YZ=LLYR/(3600.*W)
      PRINT 104,TKP,REOKR,W
      PRINT 103,D1,D2,H0,ACR,BIZ,LCR,LIZ,G,T0,TN,LLYR,YZ
      PRINT 105
      PRINT 106
      PRINT 105
      DO 59 INY=1,IY
      Y=Y1(INY)
      LTN=0.
      LTNN=0.
      X3=0.
      PT1=0.
      PT2=0.
      PT3=0.
      DP1=0.
      H1=0.
```

```
      GOTO 46
   45 Y=YZ
      INY=INY+1.
   46 LTR=3600.*W*Y
      YD=Y-YZ
      YX=YD
      IF(YD.GT.0) GOTO 44
      YD=0.
      GOTO 43
   44 LTR=LLTR
   43 IF(TN.LE.TKP) GOTO 40
      IF(TN.LE.TTBP) GOTO 41
C                 ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ НЕЙТОНОВСКИЙ
      PPA=0.
      TK=TN-0.1
    3 TK=TK-0.1
      IF(TK.LE.TBP) GOTO 4
      TF=0.5*(TK+TN)
      GOTO 5
    4 TF=0.5*(TN+TBP)
    5 TW=TF
    2 TW=TW-0.1
      AKW=SK*EXP(-US*TW)
      AKF=SK*EXP(-US*TF)
      ROF=ARO-ERO*TF
      REF=W*D1*ROF/AKF
      LNF=AL-BL*TF
      LNW=AL-BL*TW
      CW=AC+BC*TW
      CF=AC+BC*TF
      PRW=AKW*CW/LNW
      PRF=AKF*CF/LNF
      ALFA1=0.021*LNF/D1*REF**0.8*PRF**0.43*(PRF/PRW)**0.25
      A2=ALOG(CN/D2)
      A4=ALOG(D2/D1)
      ALIZ=1./(1./ALFA1*D1/(2.*CIZ)*A2*D1/(2.*LST)*A4)
      A3=COSH(ALFA0)
      KST=1./(A3/(ALIZ*C01)*1./ALFA2*1./(C01*AVO))
      KNST=2.5*KST*ALFA2*(1./ALFA2*2./(C01*AVO))
      KT=KST+KNST/(1.+AGRP*YD)
      F1=ALFA1*(TF-TW)*D1
      F2=KT*CN*(TF-T0)
      DF=F2-F1
      IF(DF.GT.FF) GO TO 7
      IF(TK.GT.TBP) GOTO 6
      X=0.
    7 X=X+XX
      GOTO 9
    6 X=LTR
    9 A2=3.14158*D1*X/(8*ROF*CF)
      SHY=KST*A2
      A=KNST*A2
      IF(TK.LE.TBP) GOTO 8
      A3=EXP(-SHY)
      A4=EXP(-AGRP*YD)
      A5=EXP(-A)
      TKR=T0*(TN-T0)*A3*(1.*A4*(1.-A5))
      IF(TKR.LT.TK) GOTO 3
      PT1= KR
      LTN=X
```

```
      GOTO 28
    8 A3=EXP(-SHY)
      A4=EXP(-ACRP*YD)
      A5=EXP(-B)
      M=A3*(1.-A4*(1.-A5))
      TET=(TBP-T0)/(TN-T0)
      IF(TET.LT.M) GOTO 7
      LTR=X
      X2=LTR-LTN
      PT1=TBP
   28 ANNA=1.0
      AA=0.3164
      BB=0.25
      YAU01=P.
      BE=0.
      CALL GIDRA(M(1),DP(1),TA,DS,ANNA,AA,BB,BE,YAU01,YTBP)
      IF(X.LT.LTR) GOTO 28
      M(2)=0.
      M(3)=0.
      DP(2)=0.
      DP(3)=0.
      GOTO 21
C        ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ ТЕПЛООТДАЧИ
   41 TBP=TN
      X2=LTR
      M(1)=0.
      DP(1)=0.
      LTN=0.
      PT1=0.
   24 TK=TBP-0.1
   12 TK=TK-0.1
      IF(TK.LE.TKP) GOTO 13
      TF=0.5*(TBP+TK)
      GOTO 14
   13 TF=0.5*(TBP+TKP)
   14 TN=TF
   18 TN=TN-0.1
      CALL RAS
      ALFA1=0.021*LNF/D1*RE0F**0.8*PRF**0.43*(PRF/PRW)**0.25
      ALIZ=1./(1./ALFA1+D1/(2.*LIZ)*ALOG(D2/D1)*
     *D1/(2.*LST)*ALOG(D2/D1))
      KST=1./(COSH(ALFA0)/(ALIZ*C01)+1./ALFA2+1./(C01*AVO))
   15 KNST=2.5*KST*ALFA2*(1./ALFA2+2./(C01*AVO))
      KT=KST+KNST/(1.+ACRP*YC)
      F1=ALFA1*(TF-TW)*D1
      F2=KT*DN*(TF-T0)
      DF=F2-F1
      IF (DF.GT.FF) GOTO 18
      IF(TK.GT.TKP) GOTO 11
      X=0.
   17 X=X+XX
      GOTO 42
   11 X=X2
   42 A3=3.14158*D1*X/(0.*POF*CF)
      SHY=KST*A3
      A=KNST*A3
      IF(TK.LE.TKP) GOTO 16
      TKR=T0+(TBP-T0)*EXP(-SHY)*(1.-EXP(-ACRP*YD)*(1.-EXP(-A)))
      IF(TKR.LT.TK) GOTO 12
      PT2=TKR
```

```
      LTNN=X
      GOTO 25
   16 M=EXP(-SHY)*(1.-EXP(-AGRP*YD)*(1.-EXP(-A)))
      TET=(TKP-T0)/(TBP-T0)
      IF(TET.LT.M) GOTO 17
      LTNN=X
      X3=X2-LTNN
      PT2=TKP
   25 A2=((6.*ANNF+2.)/ANNF)**ANNF
      A3=(3.*ANNF+1.)**2
      A4=2.*ANNF+1.
      A5=5.*ANNF+3.
      HE=TAYOF**((2.-ANNF)/ANNF)*D1**2*DOF/
     1(AKF/8.*A2)**(2./ANNF)*1.5*A3/(A4*A5)
      AA=(0.521-1.75*ANNF*4.489+ANNF**2)*
     1HE**(-0.157-0.212*ANNF)
      BB=(0.198+0.764*ANNF)*HE**(-0.098+0.161*
     1ANNF+0.06A*ANNF**2)
      CALL GIDRA(H(2),DP(2),TBP,UK,ANNF,AA,BB,B,TAYOF,TTBP)
      IF(X.LT.X2) GOTO 26
      H(3)=0.
      DP(3)=0.
      GOTO 21
C          ЛАМИНАРНЫЙ РЕЖИМ НЕНЬЮТОНОВСКИЙ
   40 TKP=TN
      X3=LTR
      H(1)=0.
      H(2)=0.
      DP(1)=0.
      DP(2)=0.
      LTN=0.
      LTNN=0.
      PT1=0.
      PT2=0.
   26 TK=TKP-0.1
   19 TK=TK-0.1
      TF=0.5*(TKP+TK)
      TW=TF
   18 TW=TW-0.1
      CALL RAS
      A2=AKF/8.*((6.*ANNF+2.)/ANNF)**ANNF
      A3=3.*ANNF+1.
      A4=2.*ANNF+1.
      A5=5.*ANNF+3..
      A6=ULF+8./A3*(ANNF+SQRT(A6**2+ULF*ANNF*A5/4.))
      A7=1.5*A3**2/(A4*A5)
      GRF=9.81*BT*(TF-TW)*D1**3*ROF**2/(A2*(D1/W)**(1.-ANNF))
     ***2*A7**2*(8./A6)**2
      ALFA1=0.17*LNF/D1*(RFCF*PRF)**0.33*
     *(GRF*PRF)**0.1*(PRF/PRW)**0.25
      ALIZ=1./((1./ALFA1)+D1/(2.*LIZ)*ALOG(DN/D2)*
     *D1/(2.*LST)*ALOG(D2/D1))
      KST=1./(COSH(ALFA0)/(ALIZ*C01)*1./ALFA2+1./(C01*AVO))
      KT=KST+KNST/(1.+AGRP*TC)
      KNST=2.5*KST*ALFA2*(1./ALFA2+2./(C01*AVO))
      F1=ALFA1*(TF-TW)*D1
      F2=KT*DN*(TF-T0)
      DF=F2-F1
      IF (DF.GT.FF) GOTO 18
      X=X3
```

```
      A2=3,14159*D1*X/(B*ROF*CPT)
      SHY=KST*A2
      A=KNST*A2
      TKR=T0*(TKP-T0)*EXP(-SHY)+(1.-EXP(-ACRP*YC)*(1.-EXP(-A)))
      IF (TKR.LT.TK) GOTO 19
   27 AA=64.
      BB=1.
      CALL CIDPA(H(3),DP(3),TKP,UK,ANNF,AA,BB,B,TAY01,TTBP)
      PT3=TKR
   21 H1=H(1)+H(2)+H(3)
      DP1=DP(1)+DP(2)+DP(3)
      PPA=DP1-CP(1)
      PRINT 151,Y,YX,LTN,PT1,DP(1),LTKN,PT2,DP(2),
     *X3,PT3,DP(3),DP1,H1,PPA,DP(3)
      IF(INY.EQ.IY) GOTO 45
   28 TK=T0
   50 CONTINUE
   58 CONTINUE
   57 CONTINUE
   56 CONTINUE
   55 CONTINUE
   54 CONTINUE
   53 CONTINUE
   52 CONTINUE
   51 CONTINUE
   58 CONTINUE
      STOP
  100 FORMAT(20X,'ТЕПЛОЕМКОСТЬ    CE=',F7.2,'+',F7.5,'*T'/
     *20X,'ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ   LN=',F6.4,'-',F6.6,'*T'/
     *20X,'ПЛОТНОСТЬ    ROF=',F5.1,'+',F5.3,'*T'/
     *20X,'ВЯЗКОСТЬ    SK=',F5.2,'*EXP(-',F5.3,'*T)'/
     *20X,'КОНСИСТЕНЦИЯ    AK=',F6.3,'*EXP(-',F5.3,'*T)'/
   81 FORMAT(20X,'ПОКАЗАТЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ    AN=',F5.3,'+',F6.4,'*TP'/
     *20X,'НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА    TAY0=',F10.3,'*(EXP(-',
     *F5.3,'*T)-EXP(-',F4.1,'*',F5.3,'))')
  122 FORMAT(20X,'К-Т ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ    BT=',F7.5)
     *20X,'ТЕМПЕРАТУРА ПРОЯВЛЕНИЯ РЕЗКОГО',
     *'ПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ    TBP=',F4.1/
     *20X,'СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПАРАФИН',
     *'НА    CP=',F5.1///)
  183 FORMAT(20X,'ВНУТРЕННИЙ ДИАМЕТР ТРУБОПРОВОДА    C1=',F5.3/
     *20X,'ВНЕШНИЙ ДИАМЕТР ТРУБОПРОВОДА    C2=',F5.3/
     *20X,'ГЛУБИНА ЗАЛОЖЕНИЯ    HB=',F5.2/
     *20X,'ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ГРУНТА    A=',F4.4/
     *20X,'ТОЛЩИНА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ    BIZ=',F4.2/
     *20X,'К-ТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ    ГРУНТА LGR=',
     *F5.3/51X,'ИЗОЛЯЦИИ LIZ=',F5.3/
     *20X,'ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ.  GB=',F5.2,'  МЛН.Т/ГОД'/
     *20X,'ТЕМП-РА ОКР.СРЕДЫ    TB=',F4.1/
     *20X,'НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА    T0=',F4.1/
     *20X,'ДЛИНА ТРУБОПРОВОДА    LTR=',F5.2/
     *20X,'ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ    TZAP=',F6.2///)
  184 FORMAT(20X,'КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА  TKP=',F4.1/
     *20X,'КРИТ. ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА REKR=',F6.1/
     *20X,'СКОРОСТЬ ПЕРЕКАЧКИ  V=',F4.2)
  185 FORMAT(1X,119('='))
  186 FORMAT(1X,'|     ВРЕМЯ      |   ТУРБ. НЬЮТ. УЧ-К   |',
     *'  ТУРБ. НЕНЬЮТ. УЧ-К  |ОБ',
     *'ЪЕМ | ОБЪЕМ |',
     *16X,'|'/1X,86('-'),'ПОТЕРЯ |ПОТЕРЯ|    ПЕРЕГАВ .  |'/
```

```
     *1X,'|РАБОТЫ |ПРОГРЕВ|  ДЛИНА |  Т  | ДАВЛЕ-|  ДЛИНА |',
     *'  Т  | ДАВЛЕ-|  ДЛИНА |  Т  | ДАВЛЕ-| ДАВЛЕ-| НАПОРА|'
     *16X,'|'/1X,'| (ЧАС) | (ЧАС) |          |КОНЕЧ|  НИЕ  |',
     *'          |КОНЕЧ|  НИЕ  |          |КОНЕЧ|  НИЕ  |',
     *'  НИЯ  |          |    ДАВЛЕНИЯ    |')
110 FORMAT(10I2)
111 FORMAT(6F5.3)
112 FORMAT(10F6.1)
113 FORMAT(10F7.0)
114 FORMAT(5F5.3)
116 FORMAT(10F4.2)
117 FORMAT(5F6.4)
118 FORMAT(12F4.1)
119 FORMAT(10F4.1)
120 FORMAT(F4.1)
121 FORMAT(2F6.3,2F5.3)
122 FORMAT(2F5.1,F5.3)
123 FORMAT(F6.4,F9.7)
124 FORMAT(F7.2,F7.5,F5.1)
125 FORMAT(F10.3,F5.3)
126 FORMAT(F4.1,F8.6)
127 FORMAT(F5.3,F6.4)
128 FORMAT(F3.0,F6.0)
129 FORMAT(50F6.1)
130 FORMAT(F5.2)
151 FORMAT(1X,'| ',F6.1,F8.1,E9.0,F6.1,F8.2,F9.0,F6.1,
    *F8.2,F9.0,F6.1,F8.2,F8.2,F8.2,F8.2,F8.2,' |')
887 FORMAT(20X,50('*')/                                          *'/
    *20X,'*                ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ                *'/
    *20X,'*                    ПУСКА ТРУБОПРОВОДА                    *'/
    *20X,'*                 ( ПОДЗЕМНАЯ ПРОКЛАДКА )                  *'/
    *20X,50('*')//)
     END
     SUBROUTINE GIDRA(W,DP,TN,D,ANN,AA,BB,B,TAY01,TBP)
     COMMON D1,AK,UK,W,Y,RCF
     COMMON /C/B,T0,SHY,ACRP,X,A,MC,P
     DIMENSION P(5),ANI(5),AMI(5),TETA(5)
     A2=2.*ANN+1.
     A3=3.*ANN+1.
     A4=5.*ANN+3.
     A5=A2*A4/A3**2*(3.14158**2)/190.
     A6=(8.*A3/(3.14158*ANN))*ANN
     BT2=8.*AA/(3.14158**2*9.81)*(A5*A6)**BB
     A7=3.14158*ANN/(8.*A3)
     A8=(D1**3)/B
     C1=(A7*A8)**ANN
     A9=ANN**(ANN+1.)*3.14158*ANN*A3**(1.*ANN)
     C2=A9/2.**(3.*ANN-1.)*A8*ANN
     SS=AK*EXP(-UK*TBP)
     C3=TAY01*EXP(-B*T0)/SS
     C4=EXP(-B*(TBP-T0))
     C5=EXP(U*(TBP-T0))
     DLT=0.
     A5=-ACRP*YD
     DO 1 J=1,5
     A4=EXP(-SHY*P(J))
     A6=EXP(-A*P(J))
     TETA(J)=A6*(1.-EXP(A5)*(1.-A6))
     A7=(TN-T0)*TETA(J)
     ANI(J)=EXP(-U*A7)
```

```
      AM(J)=EXP(-B*A7)
      S1=SQRT(A2**2+C2*C3*(AM(J)-C4)/(C5*ANI(J)))
      S2=C1-C3*(AM(J)-C4)
      S3=C5*ANI(J)/A9
    1 DLT=DLT*(S2+S3*(ANN*S1))+BB
      DEL=DLT/5.
      A2=B**(2.-2.*BB+BB*ANN)
      A3=D1**(5.-4.*BB+BB*ANN)
      A4=(SS/RCF1)**BB
      H=BTZ=A2*A4*Y*DEL/A3
      DP=H*RCF*0.0001
      RETURN
      END
      SUBROUTINE RAS
      IMPLICIT REAL(K,L)
      COMMON D1,AK,UK,M,Y,RCF
      COMMON /R/ARO,BRO,TN,TF,AN,SN,AC,BC,CP,AL,BL,LNF,TBP
      COMMON /R1/CF,AKF,ULF,REDF,PRF,PFB,TAYBF,TAYB1,B,ANNF
      RON=ARO-BRO*TN
      AKN=AK*EXP(-UK*TN)
      AKF=AK*EXP(-UK*TF)
      RCF=ARO-BRO*TF
      ANNF=AN*SN*TF
      ANNN=AN*SN*TN
      CF=AC+BC*TF+CP
      CN=AC+BC*TN+CP
      LNF=AL-BL*TF
      LNN=AL-BL*TN
      TAYBF=TAYB1*(EXP(-B*TF)-EXP(-B*TBP))
      TAYBN=TAYB1*(EXP(-B*TN)-EXP(-B*TBP))
      A2=AKF/B.*((6.*ANNF+2.)/ANNF)**ANNF
      A3=3.*ANNF+1.
      A4=2.*ANNF+1.
      A5=5.*ANNF+3.
      ULF=TAYBF*D1**ANNF/(A2*M*(ANNF))
      A6=1.5*A3**2/(A4*A5)
      A7=ULF+B./A3*(ANNF+SQRT(A6**2+ULF*ANNF*A3/B.))
      REDF=D1**ANNF*M**(2.*ANNF)*RCF/A2*A6*B./A7
      PRF=CF*(M/N)**(1.-ANNF)/)B.*LNF)*A2*A7/A6
      A2=AKN/B.*((6.*ANNN+2.)/ANNN)**ANNN
      A3=3.*ANNN+1.
      A4=2.*ANNN+1.
      A5=5.*ANNN+3.
      ULN=TAYBN*D1**ANNN/(A2*M*(ANNN))
      A6=1.5*A3**2/(A4*A5)
      A7=ULN+B./A3*(ANNN+SQRT(A6**2+ULN*ANNN*A3/B.))
      PRN=CN*(M/N)**(1.-ANNN)/)B.*LNN)*A2*A7/A6
      RETURN
      END
```

Приложение 3

Программа LUFT

```
C*****************************************************
C*            ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ             *
C*                ПУСКА ТРУБОПРОВОДА                 *
C*             ( НАДЗЕМНАЯ ПРОКЛАДКА )               *
C*****************************************************
      IMPLICIT REAL(K,L)
      REAL M
      COMMON D1,AK,UK,W,Y,RCF
      COMMON /C/Q,T0,SHY,ACRF,X,A,VC,P
      COMMON /F/ARO,BRO,TN,TF,AN,SN,AC,BC,CP,AL,BL,LNF,TBP
      COMMON /R1/CF,AKF,ULF,REOS,PRF,PRS,TAYBF,TAY01,B,ANNF
      DIMENSION D11(6),D21(6),H01(6),TN1(10),LTR1(10),LGR1(5),W(3)
      DIMENSION LIZ1(5),BIZ1(10),AGR1(5),T01(12)
      DIMENSION GI(10),Y1(50),P(5),CP(3)
      READ 110,ID,ITN,IL,ILC,ILI,IP,IA,IT0,IG,IY
      READ 111,(D11(I),I=1,IC)
      READ 111,(D21(I),I=1,IC)
      READ 119,(TN1(I),I=1,ITN)
      READ 113,(LTR1(I),I=1,IL)
      READ 114,(LGR1(I),I=1,ILC)
      READ 114,(LIZ1(I),I=1,ILI)
      READ 116,(BIZ1(I),I=1,IB)
      READ 117,(AGR1(I),I=1,IA)
      READ 118,(T01(I),I=1,IT0)
      READ 119,(GI(I),I=1,IG)
      READ 129,(Y1(I),I=1,IY)
      READ 120,TTBP
      READ 121,SK,AK,US,UK
      READ 122,ARO,ROS,BRO
      READ 123,AL,BL
      READ 124,AC,BC,CP
      READ 125,TAY01,B
      READ 126,AVO,BY
      READ 127,AN,SN
      READ 132,LST
      READ 128,FF,XX
      READ 115,AIZ
      PRINT 887
      PRINT 100,AC,BC,AL,BL,ARO,BRO,SK,US,AK,UK
      PRINT 101,AK,SN,TAY01,B,TTBP,F
      PRINT 102,BT,TTBP,CP
      P(1)=.08375
      P(2)=.31273
      P(3)=.5
      P(4)=.68727
      P(5)=.91625
      DO 50 INC=1,IC
      D1=D11(INC)
      D2=D21(INC)
      DO 51 INC=1,IC
      C=GI(INC)
      DO 52 INY=1,IY0
      T0=T01(INY)
      DO 53 INL=1,ILC
```

```
      LCR=LCR1(INL)
      DO 54 INR=1,IL
      LLTR=LTR1(INR)
      DO 55 INZ=1,ILI
      LIZ=LIZ1(INZ)
      DO 56 INB=1,IB
      BIZ=BIZ1(INB)
      DO 57 INR1=1,IA
      ACR=ACR1(INR1)
      DO 58 INA=1,ITN
      TN=TN1(INN)
      A1=D1**2
      W=42,1258*C/(ROS*A1)
      B=3,14158*W*A1/4,
C     ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
      TBP=TTBP
      T=TBP
    1 T=T-0,1
      AKT=AK*EXP(-UK*T)
      ANT=AN*SN*T
      RT=ARO-BRO*T
      TAYT=TAYR1*(EXP(-B*T)*EXP(-B*TBP)).
      A2=((6.*ANT*2.)/ANT)**ANT
      A3=3,*ANT+1,
      A4=2,*ANT+1,
      A5=5,*ANT+3,
      UL=TAYT*C1**ANT/(AKT/6.*A2*W**ANT)
      A6=D1**ANT*W**(2,-ANT)*RTZ(AKT/6.*A2)
      A7=1,5*A3**2/(A4*A5)
      A8=A6*A7
      A9=SQRT(A4**2+(UL*ANT*A3/4,))
      A10=8./(UL+8./A3*(ANT*A9))
      REO=A8*A10
      HE=TAYT**((2.-ANT)/ANT)*D1**2*RT*A7/(AKT/8,*A2)**(2,/ANT)
      REOKR=(2255.-874,*ANT)+HE*(0,875*ANT-0,813)
      IF (REO-REOKR.GT.50,) GO TO 1
      TKP=T
      PRINT 105
      DN=D2+2,*BIZ
      R1=D2/2,
      R2=DN/2,
      YZ=LLTR/(3600,*W)
      PRINT 104,TKP,REOKR,W
      PRINT 103,D1,D2,AIZ,BIZ,LIZ,C,TB,TN,LLTR,YZ
      PRINT 105
      PRINT 106
      PRINT 105
      DO 59 INY=1,IY
      Y=Y1(INY)
      LTN=0,
      LTNN=0,
      X3=0,
      PT1=0,
      PT2=0,
      PT3=0,
      DP1=0,
      H1=0,
      GOTO 46
   45 Y=YZ
      INY=INY+1
   46 LTR=3600,*W*Y
```

```
      YC=Y-YZ
      YX=YD
      IF(YD.GT.0) GOTO 44
      YD=0.
      GOTO 43
   44 LTR=LLTR
   43 IF(TN.LE.TKP) GOTO 6P
      IF(TN.LE.TTBP) GOTO 41
C                 ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
      PPA=0.
      TK=TN-1.0
    3 TK=TK-0.1
      IF(TK.LE.TBP) GOTO 6
      TF=0.5*(TK+TN)
      GOTO 5
    4 TF=0.5*(TN+TBP)
    5 TW=TF
    2 TW=TW-0.1
      AKW=SK*EXP(-US*TW)
      AKF=SK*EXP(-US*TF)
      ROF=ARO-BRO*TF
      REF=W*CL*ROF/AKF
      LNF=AL-BL*TF
      LNW=AL-BL*TW
      CW=AC+BC*TW
      CF=AC+BC*TF
      PRW=AKW*CW/LNW
      PRF=AKF*CF/LNF
      ALFA1=0.721*LNF/D1*REF**0.8*PRF**0.43*(PRF/PRW)**0.25
      B11=ALFA1*R1/LIZ
      B12=AVO*R2/LIZ
      B111=ALFA1*(R2-R1)/LIZ
      AB=B11*B12/(B11+B12+B11*B12*ALOG(W/C2))
      A1=B111**2*(5.*R1+11.*R2)
      A2=18.*B111*(3.*R1+5.*R2)
      EN=(R2-R1)**2*(A1+A2*AB*(R1+R2))
      AM=2.5*(B111*(3.*R1+5.*R2)+12.*(R1+R2))/EN
      PP=18.*(B111**2*(4.*R1+R2)+12.*B111*R1)/EN
      ACRP=AIZ*PP
      KST=LIZ*AB/R1
      KNST=2.*ALFA1*AM*(R2-R1)-B2
      KT=KST*KNST/(1.+ACRP*YC)
      F1=ALFA1*(TF-TW)*D1
      F2=KT*CW*(TF-T0)
      DF=F2-F1
      IF(DF.GT.FF) GO TO 2
      IF(TK.GT.TBP) GOTO 6
      X=0.
    7 X=X+XX
      GOTO 9
    6 X=LTR
    9 A2=3.14158*D1*X/(8*ROF*CF)
      SHY=KST*A2
      A=KNST*A2
      IF(TK.LE.TBP) GOTO 8
      A3=EXP(-SHY)
      A4=EXP(-ACRP*YD)
      A5=EXP(-A)
      TKR=T.+(TN-T0)*A3*(1.+A4*(1.+A5))
      IF(TKR.LT.TK) GOTO 3
      PT1=TKR
```

```
      LTN=X
      GOTO 28
    8 A3=EXP(-SHY)
      A4=EXP(-AGRP*YD)
      A5=EXP(-B)
      H=A3*(1.-A4*(1.-A5))
      TET=(TBP-T0)/(TN-T0)
      IF(TET.LT.H) GOTO 7
      LTN=X
      X2=LTR-LTN
      PT1=TBP
   28 ANNA=1.0
      AA=0.3164
      BB=0.25
      TAU01=0.
      BE=0.
      CALL GIDRA(H(1),DP(1),TN,QS,ANNA,AA,BB,BE,TAU01,YTBP)
      IF(X.LT.LTR) GOTO 24
      H(2)=0.
      H(3)=0.
      DP(2)=0.
      DP(3)=0.
      GOTO 21
0        ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ ТЕПЛООТДАЧИ
   41 TBP=TN
      X2=LTR
      H(1)=0.
      DP(1)=0.
      LTN=0.
      PT1=0.
   24 TK=TBP-1.0
   12 TK=TK-0.1
      IF(TK.LE.TKP) GOTO 13
      TF=0.5*(TBP+TK)
      GOTO 14
   13 TF=0.5*(TBP+TKP)
   14 TW=TF
   10 TW=T0-0.1
      CALL RAS
      ALFA1=0.021*LAF/D1*RECF**0.8*PRF**0.43*(PRF/PRW)**0.25
      B11=ALFA1*R1/LIZ
      B12=AVC*R2/LIZ
      B111=ALFA1*(R2-R1)/LIZ
      A0=B11*B12/(B11+B12+B111*B12*ALOG(R2/R1))
      A1=B111**2*(5.*R1+11.*R2)
      A2=18.*B111*(3.*R1+5.*R2)
      EA=(R2-R1)**2*(A1+A2+60.*(R1+R2))
      AM=2.5*(B111*(5.*R1+5.*R2)+12.*(R1+R2))/EA
      PP=12.*(B111**2*(4.*R1*R2)+12.*B111*R1)/EA
      AGRP=AIZ*PP
      KST=LIZ*B/R1
      KNST=2.*ALFA1*AM*(R2-R1)*12
      KT=KST+KNST/(1.+AGRP*YC)
      F1=ALFA1*(TF-TW)*D1
      F2=KT*DN*(TF-T0)
      DF=F2-F1
      IF (DF.GT.FF) GOTO 10
      IF(TW.GT.TKP) GOTO 11
      X=0.
   17 X=X+XX
      GOTO 42
```

```
11 X=X2
42 A3=3.14158*D1*X/(8*ROF*CFT
   SHY=KST*A3
   A=KNST*A3
   IF(TK.LE.TKP) GOTO 16
   TKR=T0+(TBP-T0)*EXP(-SHY)*(1.-EXP(-AGRP*YD)*(1.-EXP(-A)))
   IF(TKR.LT.TK) GOTO 12
   PT2=TKR
   LTKN=X
   GOTO 25
16 M=EXP(-SHY)*(1.-EXP(-AGRP*YD)*(1.-EXP(-A)))
   TET=(TKP-T0)/(TBP-T0)
   IF(TET.LT.M) GOTO 17
   LTKN=X
   X3=X2-LTKN
   PT2=TKP
25 A2=((6.*ANNF+2.)/ANNF)**ANNF
   A3=(3.*ANNF+1.)**2
   A4=2.*ANNF+1.
   A5=5.*ANNF+3.
   HE=TAYEF**((2.-ANNF)/ANNF)*D1**2*ROF/
  1(AKF/8.*A2)**(2./ANNF)*1.5*A3/(A4*A5)
   AA=(0.521-1.75*ANNF*4.409*ANNF**2)*
  1HE**(-0.137-0.212*ANNF)
   BB=(0.198*0.764*ANNF)*HE**(-0.098*0.161*
  1ANNF*0.664*ANNF**2)
   CALL GIDRA(H(2),DP(2),TBP,UK,ANNF,AA,BB,B,TAY01,TTBP)
   IF(X.LT.X2) GOTO 26
   H(3)=0.
   DP(3)=0.
   GOTO 21
C          ДАММИАРНЫЙ РЕЖИМ НЕНЬЕТОНЕВСКИЙ
40 TKP=TN
   X3=LTR
   H(1)=0.
   H(2)=0.
   DP(1)=0.
   DP(2)=0.
   LTK=0.
   LTKN=0.
   PT1=0.
   PT2=0.
26 TK=TKP-1.0
19 TK=TK-0.1
   TF=0.5*(TKP+TK)
   TK=TF
18 TW=TW-0.1
   CALL RAS
   A2=AKF/8.*((6.*ANNF+2.)/ANNF)**ANNF
   A3=3.*ANNF+1.
   A4=2.*ANNF+1.
   A5=5.*ANNF+3.
   A6=ULF*8./A3*(ANNF+SQRT(A6**2+ULF*ANNF*A3/4.))
   A7=1.5*A3**2/(A4*A5)
   GRF=9.81*BT*(TF-TW)*D1**3*ROF**2/(A2*(D1/M)**(1.-ANNF))
  **2*A7**2*(8./A6)**2
   ALFA1=0.17*LNF/D1*(RECF*PRF)**0.33*
  *(GRF*PRF)**0.1*(PRF/PRW)**0.25
   BI1=ALFA1*R1/LIZ
   BI2=AVO*R2/LIZ
   BI11=ALFA1*(R2-R1)/LIZ
```

```
      A0=B[1+B12/(R1+B12+B11+B12+ALOG(R2/R1))
      A1=B[11+*2+(5.+R1+11.+R2)
      A2=12.+B[11+(3.+R1+5.+R2)
      EA=(R2-R1)+*2+(A1+A2+6[.+)R1+R2))
      AM=2,5+(B[11+(3.+R1+5.+R2)+12.+(R1+R2))/EA
      PP=12.+(B[11+*2+(4.+R1+R2)+12.+B[11+R1)/EA
      ACRP=A12+PP
      KST=L12+A0/R1
      KNST=2.+ALFA1+AM+(R2+R1)+*2
      KT=KST+KNST/(1.+ACRP+YC)
      F1=ALFA1+(TF-TW)+D1
      F2=KT+CN+(TF-T0)
      DF=F2-F1
      IF (DF.GT.FF) GOTO 18
      X=X3
      A2=3,141[8+D1+X/(8+ROF+DF)
      SHY=KST+A2
      A=KNST+A2
      TKP=T0+(TKP-T0)+EXP(-SHY)+(1.-EXP(-ACRP+YC)+(1.+EXP(-A)))
      IF (TKP.LT.TK) GOTO (9
   27 AA=64.
      BB=1.
      CALL CICFA(N(3),DP(3),TKP,UK,ANNF,AA,BB,B,TAY01,TYBP)
      PT3=TKP
   21 N1=N(1)+N(2)+N(3)
      DP1=DP(1)+DP(2)+DP(3)
      PPA=DP1-DP(1)
      PRINT 15),Y,YX,LTN,PT1,DP]1),LTNN,PT2,DP(2),
     +X3,PT3,DF(3),DP1,N1,PPA,DP(3)
      IF(INT.EQ.IY) GOTO 65
   20 TK=T0
   59 CONTINUE
   58 CONTINUE
   57 CONTINUE
   56 CONTINUE
   55 CONTINUE
   54 CONTINUE
   53 CONTINUE
   52 CONTINUE
   51 CONTINUE
   50 CONTINUE
      STOP
  100 FORMAT(20X,'ТЕПЛОЕМКОСТЬ    C=',F7,2,'+',F7,5,'*T'/
     +20X,'ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ    LN=',F6,4,'-',F8,6,'*T'/
     +20X,'ПЛОТНОСТЬ    RO=',F5,1,'+',F5,3,'*T'/
     +20X,'ВЯЗКОСТЬ    SK=',F5,2,'*EXP(-',F5,5,'*T)'/
     +20X,'КОНСИСТЕНЦИЯ    AK=',F6,3,'*EXP(-',F5,5,'*T))
  101 FORMAT(20X,'ПОКАЗАТЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ    AN=',F5,3,'+',F6,4,'*T'/
     +20X,'НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА    TAYA=',F10,3,'+(EXP(-',
     +F5,3,'*T)-EXP(-',F4,1,'*',F5,3,'))')
  102 FORMAT(22X,'К-Т ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ    BT=',F7,5)
     +20X,'ТЕМПЕРАТУРА ПРОЯВЛЕНИЯ ВЯЗКО',
     +'ПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ    TBP=',F4,1/
     +20X,'СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПАРАФИ',
     +'НА    CP=',F5,1///)
  103 FORMAT(20X,'ВНУТРЕННИЙ ДИАМЕТР ТРУБОПРОВОДА    C1=',F5,3/
     +20X,'ВНЕШНИЙ ДИАМЕТР ТРУБОПРОВОДА    C2=',F5,3/
     +20X,'ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ    A=',F7,5/
     +20X,'ТОЛЩИНА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ    E1Z=',F4,2/
     +20X,'К-Т ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ    L1Z=',F9,5/
     +20X,'ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ    G=',F5,2,'  МЛН.Т/ГОД'/
```

```
     *20X,'ТЕМП-РА ОКР. СРЕДЫ    TO=',F5.1/
     *20X,'НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА  TN=',F4.1/
     *20X,'ДЛИНА ТРУБОПРОВОДА    LTR=',F7.0/
     *20X,'ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ    TZAP=',F6.2//)
104  FORMAT(20X,'КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА  TKP=',F4.1/
     *20X,'КРИТ. ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА  REKP=',F6.1/
     *20X,'СКОРОСТЬ ПЕРЕКАЧКИ  W=',F4.2)
105  FORMAT(1X,119('=')/)
106  FORMAT(1X,'|      ВРЕМЯ      |   ТУРБ. ИЬЕТ. УЧ-К   |',
     *'  ТУРБ. ЧЕНЬЕТ. УЧ-К  |   ЛАМ. ЧЕНЬЕТ. УЧ-К  |ОБ',
     *'ЧАЯ | ОБЧАЯ |',
     *16X,'|'/1X,86('-'),'ПОТЕРЯ |ПОТЕРЯ|     ПЕРЕГАД      |'/
     *1X,'|РАБОТЫ |ПРОГРЕВ|  ДЛИНА |  Т  | ДАВЛЕ-|  ДЛИНА |',
     *'  Т  | ДАВЛЕ-|  ДЛИНА |  Т  | ДАВЛЕ-| ДАВЛЕ-| НАПОРА|',
     *16X,'|'/1X,'| (ЧАС) | (ЧАС) |          |КОНЕЧ|  НИЕ  |',
     *'          |КОНЕЧ|  НИЕ  |          |КОНЕЧ|  НИЕ  |',
     *'  НИЯ  |          |     ДАВЛЕНИЯ     |')
110  FORMAT(10I2)
111  FORMAT(6F5.3)
112  FORMAT(10F6.1)
113  FORMAT(10F7.0)
114  FORMAT(5F5.3)
115  FORMAT(F7.5)
116  FORMAT(10F4.2)
117  FORMAT(5F6.4)
118  FORMAT(12F5.1)
119  FORMAT(10F4.1)
120  FORMAT(F4.1)
121  FORMAT(2F6.3,2F5.3)
122  FORMAT(2F5.1,F5.3)
123  FORMAT(F6.4,F9.7)
124  FORMAT(F7.2,F7.5,F5.1)
125  FORMAT(F10.3,F5.3)
126  FORMAT(F4.1,F8.6)
127  FORMAT(F5.3,F6.4)
128  FORMAT(F3.0,F6.0)
129  FORMAT(50F6.1)
130  FORMAT(F5.2)
151  FORMAT(1X,'| ',F6.1,F8.1,F9.0,F6.1,F8.2,F9.0,F6.1,
     *F8.2,F9.0,F6.1,F8.2,F8.2,F8.2,F8.2,F8.2,' |')
287  FORMAT(20X,50('*')/
     *20X,'*                ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ                *'/
     *20X,'*                    ПУСКА ТРУБОПРОВОДА                    *'/
     *20X,'*                 ( НАДЗЕМНАЯ ПРОКЛАДКА )                  *'/
     *20X,50('*')//)
      END
      SUBROUTINE GIDRA(W,DP,TN,U,ANN,AA,BB,B,TAY01,TBP)
      COMMON D1,AK,UK,W,Y,ROF
      COMMON /C/B,T0,SHY,ACRP,X,A,YC,P
      DIMENSION P(5),ANI(5),AMI(5),TETA(5)
      A2=2.*ANN+1.
      A3=3.*ANN+1.
      A4=5.*ANN+3.
      A5=A2*A4/A3**2*(3.14158**2)/192.
      A6=(8.*A3/(3.14158*ANN))**ANN
      BTZ=8.*AA/(3.14158**2*9.81)*(A5*A6)**BB
      A7=3.14158*ANN/(8.*A3)
      A8=(D1**3)/B
      C1=(A7*A8)**ANN
      A9=ANN*(ANN+1.)*3.14158**ANN*A3**(1.*ANN)
      C2=A9/2.**(3.*ANN-1.)*A8**ANN
```

```
      SS=AK*EXP(-UK*TBP)
      C3=TAYBI*EXP(-B*TB)/SS
      C4=EXP(-B*(TBP-TB))
      C5=EXP(U*(TBP-TB))
      DLT=0.
      A5=-AGRP*YD
      DO 1 J=1,5
      A4=EXP(-SHY*P(J))
      A6=EXP(-A*P(J))
      TETA(J)=AA*(1.-EXP(A5)*(1.-A6))
      A7=(TN-TP)*TETA(J)
      ANI(J)=EXP(-U*A7)
      AMI(J)=EXP(-B*A7)
      S1=SQRT(A2**2+C2*C3*(AMI(J)-C4)/(C5*ANI(J)))
      S2=C1*C3*(AMI(J)-C4)
      S3=C5*ANI(J)/A5
    1 DLT=DLT+(S2+S3*(ANN+S1))*WW
      DEL=DLT/5.
      A2=B**(2.-2.*BB+RB*ANN)
      A3=D1**(5.-4.*BB+BB*ANNF
      A4=(SS/RCF)**BB
      H=BTZ*A2*A4-X*DEL/A3
      DP=H+ROF*0.888
      RETURN
      END
      SUBROUTINE RAS
      IMPLICIT REAL(K,L)
      COMMON D1,AK,UK,W,Y,ROF
      COMMON /B/ARO,BRO,TW,TF,AN,SN,AC,EC,CP,AL,BL,LNF,TBP
      COMMON /B1/CF,AKF,ULF,REOF,PRF,PRB,TAYBF,TAYB1,B,ANNF
      RCW=ARC-BRO*TW
      AKW=AK*EXP(-UK*TW)
      AKF=AK*EXP(-UK*TF)
      RCF=ARO-BRO*TF
      ANNF=AN+SN*TF
      ANNW=AN+SN*TW
      CF=AC+BC*TF+CP
      CW=AC+BC*TW+CP
      LNF=AL-BL*TF
      LNW=AL-BL*TW
      TAYBF=TAYB1*(EXP(-B*TF)-EXP(-B*TBF))
      TAYBW=TAYB1*(EXP(-B*TW)-EXP(-B*TBF))
      A2=ANF/8.*((6.*ANNF+2.)/ABNF)**ANNF
      A3=3.*ANNF+1.
      A4=2.*ANNF+1.
      A5=5.*ANNF+3.
      ULF=TAYBF*D1**ANNF/(A2*W*(ANNF)
      A6=1.5*A3**2/(A4*A5)
      A7=ULF*8./A3*(ANNF*SQRT(A6**2+ULF*ANNF*A3/4.))
      RECF=D1**ANNF*W**(2.-ANNF)*RCF/A2*A6*8./A7
      PRF=CF*(P1/W)**(1.-ANNF)/8.*LNF*A2*A7/A6
      A2=ANW/8.*((6.-ANNW+2.)/ABNW)**ANNW
      A3=3.*ANNW+1.
      A4=2.*ANNW+1.
      A5=5.*ANNW+3.
      ULW=TAYBW*D1**ANNW/(A2*W*(ANNW)
      A6=1.5*A3**2/(A4*A5)
      A7=ULW*8./A3*(ANNW*SQRT(A6**2+ULW*ANNW*A3/4.))
      PRW=CW*(P1/W)**(1.-ANNW)/8.*LNW*A2*A7/A6
      RETURN
      END
```

Приложение 4

Распечатка выходной информации программ
BODEN и LUFT

```
*************************************************
*          ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ           *
*              ПУСКА ТРУБОПРОВОДА               *
*          ( ПОДЗЕМНАЯ ПРОКЛАДКА )              *
*************************************************

ТЕПЛОЕМКОСТЬ   C=1824.77+3.67000*T
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ   LA=0.1370-0.000074*T
ПЛОТНОСТЬ   RO=863.4+0.557*T
ВЯЗКОСТЬ   SK= 1.03*EXP(-0.000*T)
КОНСИСТЕНЦИЯ   AN=25.900*EXP(-0.155*T)
ПОКАЗАТЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ   AN=0.526+0.0114*T
НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА   TAY0=  6651.934*(EXP(-0.235*T)-EXP(-45.0*0.235))
К-Т ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ   BT=0.00060
ТЕМПЕРАТУРА ПРОЯВЛЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ   TB*=45.0
СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПАРАФИНА   CP=648.2


КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА   TKP=35.0
КРИТ. ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА   REKP=2044.3
СКОРОСТЬ ПЕРЕКАЧКИ   V=1.01
ВНУТРЕННИЙ ДИАМЕТР ТРУБОПРОВОДА   D1=0.996
ВНЕШНИЙ ДИАМЕТР ТРУБОПРОВОДА   D2=1.020
ГЛУБИНА ЗАЛОЖЕНИЯ   HB= 1.40
ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ГРУНТА   A=0.0020
ТОЛЩИНА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ   BIZ=0.10
К-ТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ:   ГРУНТА LCR=1.000
                                 ИЗОЛЯЦИИ LIZ=0.050
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ   G=20.00  МЛН.Т/ГОД
ТЕМП-РА ОКР.СРЕДЫ   TB= 2.0
НАЧАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА   TN=50.0
ДЛИНА ТРУБОПРОВОДА   LTR=200000.
ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ   TZAP= 55.02


*****************************************************************************
|      ВРЕМЯ      |  ТУРБ. НЬЮТ. УЧ-К  |  ТУРБ. НЕНЬЮТ. УЧ-К  |
-----------------------------------------------------------------------------
|РАБОТЫ |ПРОГРЕВ|  ДЛИНА |  Т  | ДАВЛЕ-|  ДЛИНА |  Т  | ДАВЛЕ-|
| (ЧАС) | (ЧАС) |        |КОНЕЧ|  НИЕ  |        |КОНЕЧ|  НИЕ  |
-----------------------------------------------------------------------------
|   60.0     5.0   40000.  45.0    3.85  116000.  35.8   11.27
|   72.0    17.0   54000.  45.0    5.20  146000.  36.4   14.15
|   90.0    41.0   84000.  45.0    8.69  116000.  40.3   11.19
|  120.0    65.0  107000.  45.0   10.30   93000.  42.0    9.05
| 1300.0   945.0  132000.  45.0   12.51   70000.  43.1    6.96
| 2700.0  1945.0  132000.  45.0   12.51   70000.  43.1    6.96
|   55.0     0.0   35000.  45.0    3.37  101000.  35.8    9.81
```

Продолжение таблицы выходной информации

ЛАМ. НЕНЬЮТ. УЧ-К		СЕКАР	СБ.АР		
		ПОТЕРЯ	ПОТЕРЯ	ПЕРЕПАД	
ДЛИНА	Т	ДАВЛЕ-	ДАВЛЕ-	НАПОРА	
	КОНЕЧ	НИЯ	НИЯ	ДАВЛЕНИЯ	
44000.	32.0	6.00	21.21	252.18	17.34	6.00
0.	0.0	0.0	19.35	232.44	14.15	0.0
0.	0.0	0.0	19.21	229.08	11.19	0.0
0.	0.0	0.0	19.35	232.26	9.07	0.0
0.	0.0	0.0	19.46	232.37	6.94	0.0
0.	0.0	0.0	19.46	232.37	6.96	0.0
64220.	31.0	11.26	24.45	292.28	21.09	11.26

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
I. Перечень условных обозначений	3
I.I. Индексы	3
I.2. Обозначения	5
I.3. Константы	7
I.4. Параметры	8
2. Исходные данные для расчета	I0
3. Определение критических параметров потока жидкости	I4
4. Пуск трубопровода в эксплуатацию	I6
4.I. Тепловой расчет	I6
4.2. Гидравлический расчет	22
5. Определение времени безопасной остановки трубопровода	25
5.I. Расчет времени остановки подземного трубопровода	25
5.2. Расчет времени остановки надземного трубопровода	26
5.3. Гидравлический расчет	26
5.4. Графоаналитический метод	29
6. Определение ореолов протаивания грунтов вокруг трубопровода и тепловой расчет	3I
Список литературы	34
Приложение I. Справочные таблицы	36
Приложение 2. Программа BODEN. Теплогидравлический расчет пуска трубопровода (подземная прокладка).	40
Приложение 3. Программа LUFT. Теплогидравлический расчет пуска трубопровода (надземная прокладка).	48
Приложение 4. Распечатка выходной информации программ BODEN и LUFT	56

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

М Е Т О Д И К А

РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОКЛАДКИ ИХ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

РД 39-30-1061-84

ВНИИСПТнефть

450055, Уфа, просп.Октября, 144/3

Редактор Г.Л.Левченко

Технический редактор В.В.Антошкина

Подписано к печати 3.09.1984 г.
Формат 60х90 1/16. Уч.-изд.л. 2,7. Тираж 140 экз.
Заказ 152
Ротапринт ВНИИСПТнефти

gost.e-ecolog.ru