МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВНИИСПТнефть

# МЕТОДИКА
## ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ НЕФТЕЙ

РД 39 - 30 - 40 - 78

gost.e-ecolog.ru

1978

Министерство нефтяной промышленности

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

Утверждена
Начальником Технического
Управления
Г.И.Григораценко
17 января 1978 года

# МЕТОДИКА

# ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ НЕФТЕЙ

РД 39-30-40-78

1978

В ближайшее время намечается прокладка нефтепроводов на Крайнем Севере, в зонах вечной мерзлоты , где при отрицательных температурах маловязкие нефти ведут себя как степенные, вязкопластичные и нелинейновязкопластичные жидкости.

Предлагаемая "Методика"... рекомендуется для выполнения расчетов при перекачке нелинейновязкопластичных нефтей.

Базой для составления "Методики..." явились теоретические и экспериментальные исследования отдела трубопроводного транспорта ВНИИСПТнефти и литературные рекомендации, подтвержденные экспериментами.

Вычисления по "Методике..." выполняются вручную или на ЭВМ.

"Методика..." составлена к.т.н. Тонкошкуровым Б.А., Гумеровой У.И.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

---

Методика гидравлического расчета магистральных нефтепроводов при изотермическом режиме течения нелинейновязкопластичных нефтей

РД - 39- 30- 40- 78

---

Приказом Министерства нефтяной промышленности от 25.01.78 № 60

Срок введения установлен с 01.07.78

Срок действия до _____

Вводится впервые

Методика предназначена для выполнения гидравлического расчета магистральных нефтепроводов при установившемся режиме перекачки в области температур, где перекачиваемые нефти являются нелинейновязкопластичными, бингамовскими, степенными или ньютоновскими жидкостями.

## I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I.Маловязкие нефти, являющиеся нормальными (ньютоновскими жидкостями) в области более высоких температур, имеют тенденцию к проявлению неньютоновских свойств при более низких температурах.

Переход от ньютоновских свойств к степенным, вязкопластичным и нелинейновязкопластичным происходит плавно с понижением температуры [I].

Такие явления наблюдаются при перекачке нефтей по трубопроводам в районах Севера, Европейской части и Западной Сибири.

I.2.Методика позволяет определить:

а)перепад давления, необходимый для перекачки заданного объема жидкости;

б)расход нефти при известном перепаде давления на заданном участке;

в)диаметр трубопровода, необходимый для обеспечения заданного расхода жидкости при известном перепаде давления.

I.3.В методике приняты следующие условные обозначения и параметры.

Обозначения:

$D$ - диаметр, м;

$L$ - длина трубопровода, м;

$M$ - массовый расход, кг/с;

$Q$ - объемный расход, $м^3/с$;

$W$ - скорость течения, м/с;

$\rho$ - плотность, $кг/м^3$;

$\Delta P$ - потери давления на трение, $н/м^2$, $кг/см^2$;

$\tau$ - напряжение сдвига, $н/м^2$;

$\tau_w$ - напряжение сдвига на стенке, $н/м^2$;

$\lambda$ - коэффициент гидравлического сопротивления;

$a, b$ - переменные числа в формуле коэффициента гидравлического сопротивления для турбулентного режима;

$\frac{dw}{dr}$ - градиент скорости на радиусе $r$, $c^{-1}$;

$n$ - степень неньютоновского поведения жидкости;

$K$ - мера консистентности жидкости, $\frac{Н \cdot с^n}{м^2}$;

$h$ - потери напора на трение, м.

Параметры:

$$И' = \frac{\tau_0 D^n}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n W^n}$$

- параметр Ильюшина для нелинейновязкопластичной жидкости;

$$\Delta P_0 = \frac{4\tau_0 L}{D}$$ – давление сдвига для вязкопластичной жидкости;

$$He = \frac{\tau^{\frac{2n}{n}} D^2 \rho}{\left[\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\right]^{\frac{2}{n}} 2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$ – критерий Хедстрема для нелинейновязкопластичной жидкости;

$$Re^* = Re' \frac{8}{\left\{И' + \frac{8}{3n+1}\left[n + \sqrt{(2n+1)^2 + n\frac{И'}{4}(3n+1)}\right]\right\}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$ – обобщенный параметр Рейнольдса;

$$Re^*_{кр} = \frac{2100}{1 - \frac{2n}{3n+1}\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)_{кр}}$$ – критическое значение обобщенного параметра Рейнольдса;

$$Re' = \frac{D^n W^{2-n} \rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n}$$ – параметр Рейнольдса для степенной жидкости (псевдопластика);

$$Re_c = \frac{D^n W^{2-n} \rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$ – обобщенный параметр Рейнольдса для степенной жидкости (псевдопластика).

I.4. Для выполнения расчетов по методике необходимы следующие исходные данные:

а) производительность перекачки – $M$ ;

б) внутренний диаметр трубопровода – $D_{вн}$ ;

в)длина трубопровода - $\ell$ ;

г)перепад давления на всей длине трубопровода - $\Delta P$;

д)кривая течения нефти $\tau=\tau_0+\kappa\left(\frac{dw}{dr}\right)^n$;

е)зависимость плотности нефти от температуры - $\rho=f(t)$;

ж)данные о среднемесячных температурах грунта по трассе на глубине заложения трубопровода.

Величины по пунктам а) и г) могут совместно не задаваться. В этом случае, если величины известны, задача расчета сводится к определению необходимого диаметра трубопровода.

Гидравлический расчет трубопровода производится для значения температуры нефти, соответствующей наименьшей среднемесячной температуре грунта на глубине заложения трубы. Однако можно определить точный объем перекачки по трубопроводу в течение года, учитывая среднюю температуру грунта по месяцам.

I.5.Для жидкостей, которые при понижении температуры проявляют неньютоновские свойства, наиболее применимым реологическим уравнением является закон Балкли-Гершеля [2]

$$\tau=\tau_0+\kappa\left(\frac{dw}{dr}\right)^n. \qquad (I)$$

Результаты вискозиметрических исследований представляются в виде равновесных кривых течения (рис.I), выражающих зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига.

Степень неньютоновского поведения " $n$ " и мера консистентности " $K$ " определяются по кривым течения (см.рис.I). Составляется уравнение по закону Балкли-Гершеля для двух скоростей сдвига, т.е.

$$\begin{cases}\tau_1=\tau_0+\kappa S_1^n\\ \tau_2=\tau_0+\kappa S_2^n\end{cases}$$

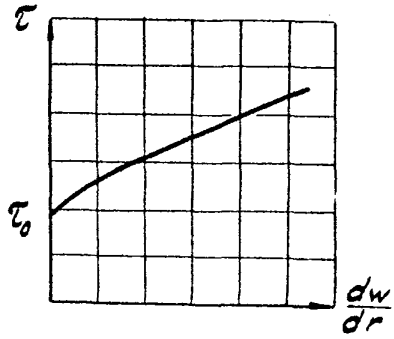


Рис.I. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига

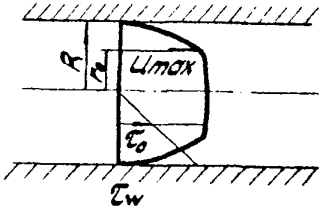


Рис.2. Профиль скорости при течении нелинейно-вязкопластичной жидкости

и решается относительно " $K^0$ " и " $n$ ".

I.6.Профиль скорости при течении нелинейновязкопластичных жидкостей имеет вид (рис.2) и описывается уравнением

$$W=\int_{r}^{R} f(\tau)dr=\frac{1}{K^{1/n}}\cdot\frac{R}{\tau_w}\cdot\frac{n}{n+1}\left[(\tau_w-\tau_0)^{1+\frac{1}{n}}-(\tau_w\cdot\frac{r}{R}-\tau_0)^{1+\frac{1}{n}}\right],\quad(2)$$

где $R$ - радиус трубы, м;

$r$ - произвольный радиус от центра трубы до стенки, м;

При этом скорость ядра потока вычисляется по формуле

$$W_0=\frac{1}{K^{1/n}}\cdot\frac{n}{n+1}R\tau_w^{1/n}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{1+\frac{1}{n}}.\qquad(3)$$

I.7.Уравнение движения в круглой трубе жидкости, подчиняющейся закону Балкли-Гершеля, имеет вид [3]

$$Q=\frac{n\pi R^3}{(3n+1)K^{1/n}}\cdot\tau_w^{1/n}\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{1+\frac{1}{n}}\left[1+\frac{2n}{2n+1}\cdot\frac{\tau_0}{\tau_w}+\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}\cdot\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^2\right],\quad(4)$$

а средняя скорость

$$W_{cp}=\frac{4Q}{\pi D^2},\qquad(5)$$

$$\tau_w=\frac{(3n+1)^n K_w^n}{n^n R^n}\cdot\frac{1}{\left(1-\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{n+1}\left[1+\frac{2n}{2n+1}\cdot\frac{\tau_0}{\tau_w}\cdot\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}\cdot\left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^2\right]^n}.\quad(6)$$

## 2.ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Методика позволяет вести гидравлические расчеты в области ламинарного и турбулентного режима течения нефти в трубопроводе.

2.I.Ламинарный режим течения

Ламинарное течение нелинейновязкопластичной нефти в трубе кругового сечения характеризуется наличием центрального ядра потока, движущегося с постоянной максимальной скоростью, с характерным профилем скорости (см.рис.2).

Относительный радиус ядра потока определяется отношением

$$\frac{\tau_0}{\tau_w}=\frac{\Delta p_0}{\Delta p}=\frac{r_0}{r}, \qquad (7)$$

где

$$\frac{r_0}{R}=\frac{H'}{H'+\frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{H'}{4}n(3n+1)}\right]}. \qquad (8)$$

Перепад давления в трубопроводе определяется по формуле [4]

$$\Delta p=\frac{4\tau_w L}{D}, \qquad (9)$$

после подстановки вместо $\tau_w$ соотношения из (7) получится

$$\Delta p=\frac{4\tau_0 RL}{r_0 D}, \qquad (9)^a$$

Если отношение $\frac{r_0}{R}$ обозначить через $\bar{r}_0$ (относительный радиус ядра течения), можно придать уравнению (9) следующий вид:

$$\Delta p = \frac{4\bar{\tau}_0 L}{\bar{r}_0 D} . \qquad (10)$$

Если учесть, что $\bar{r}_0$ выражается уравнением (8), а

$$\Delta p_0 = \frac{4\tau_0 L}{D} , \qquad (11)$$

вместо (9) получится выражение

$$\Delta p = \Delta p_0 \left(1 + \frac{\alpha}{\beta}\frac{8}{и'} + \sqrt{\frac{\alpha^2+1}{\beta}\frac{8^2}{и'^2} + 2\frac{\alpha}{\beta}\cdot\frac{8}{и'}}\right), \qquad (12)$$

где

$$\alpha = \frac{n}{\sqrt{(3n+1)(n+1)}}; \qquad \beta = \sqrt{\frac{3n+1}{n+1}} .$$

Потери напора на трение и гидравлический уклон в трубопроводе заданного диаметра и длины при известных нивелирных отметках начала и конца трубопровода рассчитывают соответственно по формуле [5]

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + (z_1 - z_2) , \qquad (13)$$

$$i = \frac{h}{L} , \qquad (14)$$

Расход нефти в трубопроводе заданного диаметра, длины и профиля по известному перепаду давления определяется из уравнения (4), учитывая уравнение (7).

В результате аппроксимации вместо (4) получится:

$$Q=\frac{n\pi R^3}{(3n+1)K^{1/n}}\left(\frac{\Delta pR}{2L}\right)^{1/n}\left\{\beta\left[\sqrt{a^2+\left(1-\frac{\Delta p_a}{\Delta p}\right)^2}-a\right]\right\}^{1/n}. \qquad (15)$$

Диаметр трубопровода, необходимый для перекачки известного объема нефти и перепада давления, определяется следующим образом. Из уравнения (15) определится ориентировочный радиус, если пренебречь выражением в фигурной скобке

$$R=\left[\frac{Q(3n+1)}{n\pi}\cdot\left(\frac{2kL}{\Delta p}\right)^{1/n}\right]^{\frac{n}{3n+1}}. \qquad (16)$$

Задается ряд условных значений $D>D^*$. Затем для каждого $D$ вычисляется по формуле (13) соответствующий данному диаметру перепад давления в трубопроводе и строится график. Точка пересечения линии заданного перепада давления с кривой определяет величину необходимого диаметра трубопровода.

Пользуясь уравнением (13), можно определить коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda$ при ламинарном движении нелинейновязкопластичной жидкости в трубопроводе [6].

Чтобы зависимость коэффициента сопротивления от параметра Рейнольдса была единой как для ньютоновских, так и для неньютоновских жидкостей, параметр Рейнольдса в ней должен быть

обобщенным

$$\lambda = \frac{64}{Re^*}, \qquad (17)$$

а при учете нелинейновязкопластичных свойств жидкости

$$\lambda = \frac{64}{Re_c}\varphi(И', n), \qquad (18)$$

где $Re_c$ – обобщенный параметр Рейнольдса для степенной жидкости.

При подстановке зависимости (13) в формулу Дарси-Вейсбаха

$$h = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{W^2}{2g} \qquad (19)$$

получится следующее уравнение для определения коэффициента гидравлического сопротивления при движении нелинейновязкопластика в трубопроводе:

$$\lambda = \frac{64}{Re_c} \cdot \frac{\left[И' + 8\frac{\alpha}{\beta}\left(1+\sqrt{\frac{\alpha^2+1}{\alpha}+2\frac{\beta}{\alpha}\cdot\frac{И'}{8}}\right)\right]}{8}, \qquad (20)$$

где $Re_c = \frac{D^n W^{2-n}\rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$;

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{n}{3n+1}; \qquad \frac{\alpha^2+1}{\alpha^2} = \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n.$$

Таким образом,

$$\lambda = \frac{64}{Re_c} \cdot \frac{\left\{И' + \frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+\frac{nИ'}{4}(3n+1)}\right]\right\}}{8}. \qquad (21)$$

## 2.2. Определение границы существования ламинарного режима

При переходе ламинарного режима течения в трубопроводе в турбулентное, критическое значение относительного ядра потока рекомендуется определить из уравнения (7)

$$He_c = \frac{2100\left(8\bar{r}_{o\,кр}\right)^{\frac{2-n}{n}}}{\left[1-\frac{2n}{3n+1}\bar{r}_{o\,кр}\right]\left\{\left[1-\bar{r}_{o\,кр}\right]^{1+1/n}\left[1+\frac{2n}{2n+1}\bar{r}_{o\,кр}+\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}\bar{r}_{o\,кр}^{2}\right]\right\}^2}, \qquad (22)$$

где

$He_c$ – критерий Хедстрема для нелинейновязкопластика;

$\bar{r}_{o\,кр}$ – определяется из рисунка 8, на котором представлен график изменения $\bar{r}_{\cdot\,кр}$ от величины Хедстрема $He_c$ и $n$. При определении $\bar{r}_{\cdot\,кр}$ следует считать, что для значения $\bar{r}_{\cdot} > \bar{r}_{\cdot\,кр}$ режим течения будет ламинарным, а для $\bar{r}_{\cdot} < \bar{r}_{\cdot\,кр}$ – турбулентным.

Критическая скорость ламинарного потока рассчитывается по формуле [7]

$$W_{кр} = \frac{16{,}2\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}{\sqrt{\frac{3}{2}\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}\left[1-\frac{2n}{3n+1}\bar{r}_{o\,кр}\right]\bar{r}_{o\,кр}}}. \qquad (23)$$

При значении $\bar{r}_{o\,кр}=1$ и $n=0$ (поршневое течение)

$$W_{кр} = 23\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}.$$

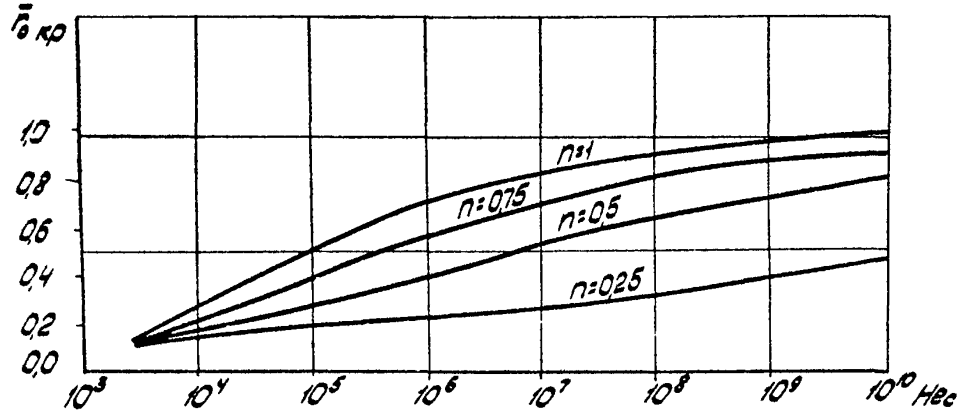


Рис.3. Зависимость критического радиуса ядра потока от параметра Хедстрема

2.2.1.Экспериментальные исследования показывают, что для различных жидкостей (ньютоновских и неньютоновских) критическое число Рейнольдса неодинаково. Так у ньютоновских жидкостей оно равно 2100, а у бингамовских пластиков и псевдопластиков изменяется от 2000 до 5000. Ведутся поиски параметра Рейнольдса, пригодного для расчетной перекачки и позволяющего однозначно определять критическое его значение. Однако критическое значение обобщенного числа Рейнольдса непостоянно и зависит от характеристики потока нелинейновязкопластика.

По результатам исследований критических параметров потока при течении нелинейновязкопластичной жидкости на основании модели Балкли-Гершеля критическое число Рейнольдса можно представить следующим выражением [7]:

$$Re^{*}_{кр} = \frac{2100}{1-\frac{2n}{3n+1}\bar{\tau}_{0кр}} \cdot \qquad (24)$$

Обобщенный параметр Рейнольдса $Re^{*}$ определяется по уравнению [7]

$$Re^{*} = Re' \frac{8}{\left\{И' + \frac{8}{3n+1}\left[n + \sqrt{(2n+1)^2 + n\frac{И'}{4}(3n+1)}\right]\right\}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)}{(2n+1)(5n+3)}, \qquad (25)$$

где $Re' = \frac{D^n W^{2-n} \rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n}$; $\quad И' = \frac{\tau_0 D^n}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n W^n}$.

Критическое значение обобщенного параметра Рейнольдса определено из условия $Re_э$ =2100 по зависимости

$$Re_э = Re^*\left(1 - \frac{2n}{3n+1}\bar{r}_0\right). \qquad (26)$$

Расчеты по формуле (22) и (23) позволяют получить график зависимости $Re_{кр}$ от $He_c$ , который представлен на рис.4. График $Re^*_{кр}$ от $He_c$ дает возможность определить критическое значение обобщенного числа Рейнольдса $Re^*_{кр}$ , если известны свойства жидкости и диаметр трубопровода.

В области перехода к турбулентному течению будет наблюдаться расслоение данных по параметрам Хедстрема и " $n$ ". Только действительный параметр Рейнольдса $Re_э$ позволяет однозначно определить границу перехода ламинарного течения к турбулентному.

Значение коэффициента гидравлического сопротивления при нарушении структурного режима также постоянно и равно

$$\lambda_э = \frac{64}{Re_э} = \frac{\lambda}{1 - \frac{2n}{3n+1}\bar{r}_0} = \frac{64}{2100} \cong 0{,}03, \qquad (27)$$

где

$$\lambda = \frac{64}{Re^*}. \qquad (28)$$

## 2.3. Турбулентный режим течения

При турбулентном режиме течения вязкопластичной жидкости коэффициент гидравлического сопротивления можно рассчитывать

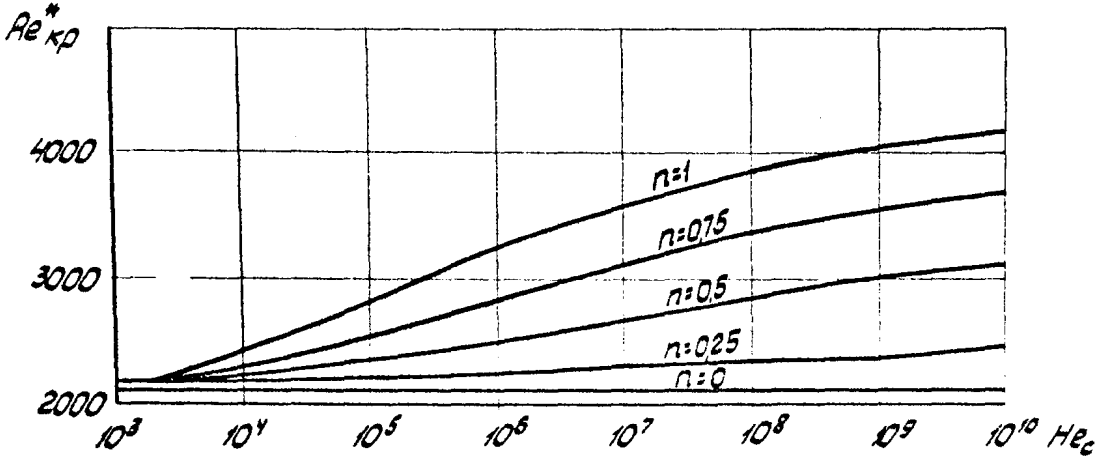


Рис.4. Зависимость $Re_{кр}$ от $He_c$.

по формуле [7]

$$\lambda = \frac{a}{Re^{b}} , \qquad (29)$$

где $a$ и $b$ - переменные числовые коэффициенты.

Значения коэффициентов $a$ и $b$ в зависимости от значения параметра Хедстрема и от параметра $n$ можно определить по графику (рис.5).

Таким образом, коэффициент гидравлического сопротивления определяется двумя взаимно независимыми параметрами $Re$ и $He$. Формула (29) применима в области значений $10^3 \leq He \leq 10^6$ и $0 \leq n \leq 1$. При $He < 10^3$ значения $a$ и $b$ берутся при $He = 10^3$. При $He > 10^6$ коэффициент гидравлического сопротивления не зависит ни от $Re$, ни от $He$ и берется $\lambda = 0{,}0156$. Потери напора на трение определяются по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{W^2}{2g} .$$

## 3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

3.I. Определить перепад давления в трубопроводе диаметром 720хI0 и длиной 4I0 км. По трубопроводу перекачивается нелинейно-вязкопластичная жидкость с $\rho = \frac{840 \text{ кг}}{\text{м}^3}$, $\tau = 2{,}402$ н/м$^2$ (рис.6), $n = 0{,}424$, $K = I{,}272 \frac{H \cdot c^n}{M^2}$, годовой производительностью $M = 2{,}5$ млн т/год.

Средняя скорость потока

$$W = \frac{4M}{\rho \pi D^2} = \frac{4 \cdot 2{,}5 \cdot 10^6}{0{,}84 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}7^2 \cdot 360 \cdot 24 \cdot 3600} = 0{,}249 \text{ м/с} .$$

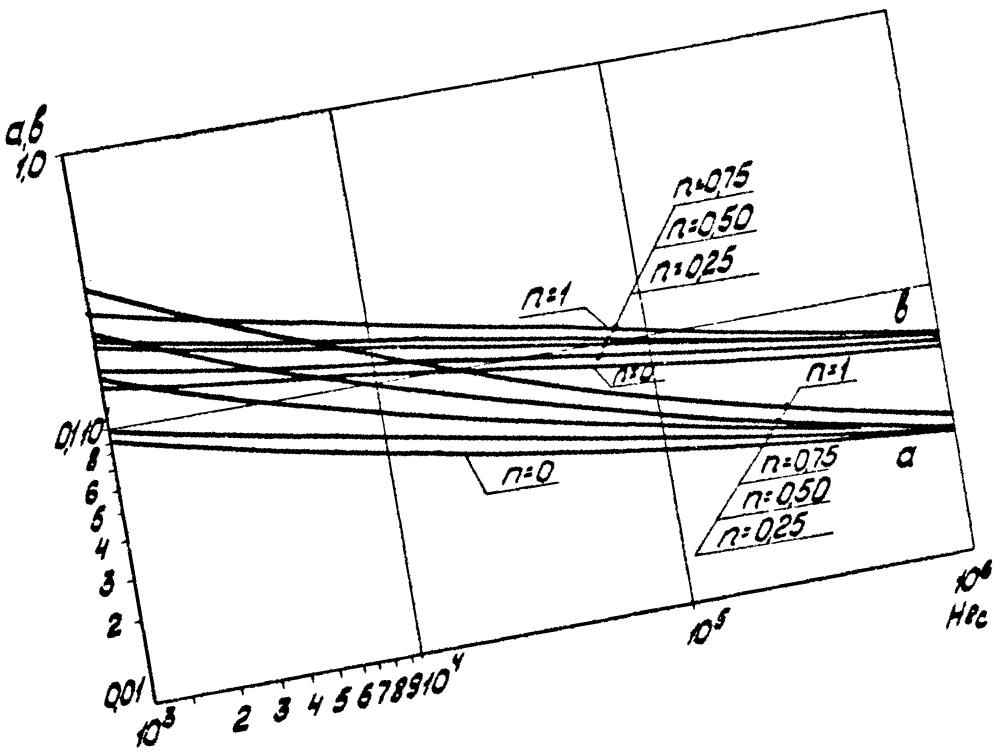


Рис.5. Значения коэффициентов «$a$» и «$b$» в зависимости от «$H_{вс}$» и «$n$»

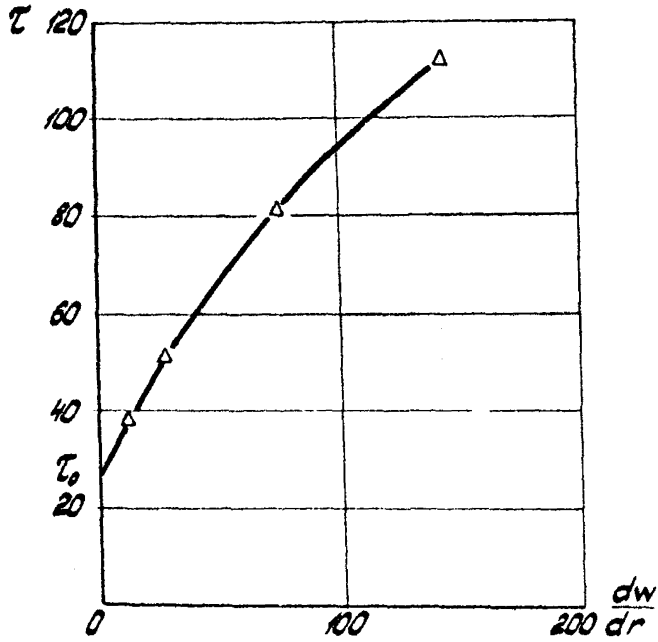


Рис.6. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для нелинейновязкопластичной нефти

Параметр Ильюшина

$$И' = \frac{\tau_0 D^n}{\frac{K}{8}\frac{(6n+2)^n}{n} w^n} = \frac{2{,}402 \cdot 07^{0{,}424}}{\frac{1271}{8}\left(\frac{6 \cdot 0{,}424+2}{0{,}424}\right)^{0{,}424} \cdot 0{,}249^{0{,}424}} = 9{,}67.$$

Параметр Хедстрема

$$He = \frac{\tau_0^{\frac{2-n}{n}} \cdot D \cdot \rho}{\left[\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n\right]^{2/n}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)} = \frac{2402^{\frac{2-0{,}424}{0{,}424}} \cdot 07^2 \cdot 840}{\left[\frac{1271}{8}\left(\frac{6 \cdot 0{,}424+2}{0{,}424}\right)^{0{,}424}\right]^{2/0{,}424}} \cdot$$

$$\cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3 \cdot 0{,}424+1)^2}{(2 \cdot 0{,}424+1)(5 \cdot 0{,}424+3)} = 4{,}5 \cdot 10^5.$$

Относительный радиус ядра потока

$$\bar{r}_0 = \frac{И'}{И' + \frac{8}{3n+1}\left[n + \sqrt{(2n+1)^2 + \frac{И'}{4} n (3n+1)}\right]} =$$

$$= \frac{9{,}67}{9{,}67 + \frac{8}{3 \cdot 0{,}424+1}\left[0{,}424 + \sqrt{(2 \cdot 0{,}424+1)^2 + \frac{9{,}67}{4} 0{,}424 (3 \cdot 0{,}424+1)}\right]} = 0{,}5.$$

Критическое значение радиуса ядра потока по графику (см. рис.3) для $He_c = 4{,}5 \cdot 10^5$, $\bar{r}_{0кр} = 0{,}31$ $\bar{r}_0 > \bar{r}_{0кр}$ – режим течения ламинарный.

Перепад давления в трубопроводе

$$\Delta P = \Delta P_0 \left(1 + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{8}{И'} + \sqrt{\frac{\alpha^2+1}{\beta} \cdot \frac{8^2}{И'^2} + 2\frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{8}{И'}}\right),$$

где

$$\Delta P_0 = \frac{4\tau_0 L}{D} = \frac{4 \cdot 2{,}402 \cdot 410 \cdot 10^3}{0{,}7} = 562 \cdot 10^6 \frac{Н}{м^2} \text{ или } 5736 \frac{кг}{см^2},$$

$$\alpha = \frac{n}{\sqrt{(3n+1)(n+1)}} = \frac{0{,}424}{\sqrt{(3\cdot 0{,}424+1)(0{,}424+1)}} = 0{,}2358,$$

$$\beta = \sqrt{\frac{3n+1}{n+1}} = \sqrt{\frac{3\cdot 0{,}424+1}{0{,}424+1}} = 1{,}2628,$$

$$\Delta D = 5{,}62\cdot 10^6 \left(1 + \frac{0{,}2358}{1{,}2628}\cdot\frac{8}{9{,}67} + \sqrt{\frac{0{,}2358^2+1}{1{,}2628^2}\cdot\frac{8^2}{9{,}67^2} + 2\,\frac{0{,}2358}{1{,}2628}\cdot\frac{8}{9{,}67}}\right) =$$

$$= 1{,}14\cdot 10^7 \frac{Н}{м^2} = 116{,}18 \frac{кг}{см^2}.$$

3.2. По условиям примера 3.1 выполнить расчеты для $M = 21$ млн т/год.

Средняя скорость потока

$$W = \frac{4\cdot 21\cdot 10^6}{0{,}84\cdot 3{,}14\cdot 0{,}7^2\cdot 24\cdot 3600\cdot 360} = 2{,}089 \frac{м}{с}.$$

Параметр Ильюшина

$$И' = \frac{2{,}402\cdot 0{,}7^{0{,}424}}{\frac{1{,}271}{8}\left(\frac{6\cdot 0{,}424+2}{0{,}424}\right)^{0{,}424}\cdot 2{,}089^{0{,}424}} = 3{,}92.$$

Параметр Хедстрема

$$He = \frac{2{,}402\cdot 0{,}7^{\frac{2-0{,}424}{0{,}424}}\cdot 840}{\left[\frac{1{,}271}{8}\left(\frac{6\cdot 0{,}424+2}{0{,}424}\right)^{0{,}424}\right]^{2/0{,}424}}\cdot\frac{3}{2}\cdot\frac{(3\cdot 0{,}424+1)^2}{(2\cdot 0{,}424+1)(5\cdot 0{,}424+3)} = 45\cdot 10^5.$$

Относительный радиус ядра потока

$$\bar{r}_0 = \frac{3{,}92}{3{,}92 + \frac{8}{3\cdot 0{,}424+1}\left[0{,}424+\sqrt{(2\cdot 0{,}424+1)^2+\frac{3{,}92}{4}\cdot 0{,}424(3\cdot 0{,}424+1)}\right]} = 0{,}307,$$

$\bar{r}_{0кр} = 0{,}31,$

$\bar{r}_0 = \bar{r}_{0кр}$ – область переходного режима считали как турбулентный режим

Обобщенное число Рейнольдса

$$Re^{*} = Re' \frac{8}{\left\{И' + \frac{8}{3n+1}\left[n+\sqrt{(2n+1)^2+n\frac{И'}{4}(3n+1)}\right]\right\}} \cdot \frac{3}{2}\cdot\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)},$$

где

$$Re' = \frac{D^n W^{2-n}\rho}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n} = \frac{0{,}7\cdot 2{,}089^{2-0{,}424}\cdot 840}{\frac{1{,}271}{8}\left(\frac{6\cdot 0{,}424+2}{0{,}424}\right)^{0{,}424}} = 4326,$$

$$И' = \frac{\tau_0 D^n}{\frac{K}{8}\left(\frac{6n+2}{n}\right)^n W^n} = \frac{2{,}402\cdot 0{,}7^{0{,}424}}{\frac{1{,}271}{8}\left(\frac{6\cdot 0{,}424+2}{0{,}424}\right)^{0{,}424}\cdot 2{,}089^{0{,}424}} = 3{,}92,$$

$$Re^{*} = \frac{4326\cdot 8}{\left\{3{,}92 + \frac{8}{3\cdot 0{,}424+1}\left[0{,}424+\sqrt{(2\cdot 0{,}424+1)^2+0{,}424\frac{3{,}92}{4}(3\cdot 0{,}424+1)}\right]\right\}} \cdot \frac{3}{2}\cdot\frac{(3\cdot 0{,}424+1)^2}{(2\cdot 0{,}424+1)(5\cdot 0{,}424+3)} = 2219.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda = \frac{a}{Re^b} = \frac{0{,}052}{2219^{0{,}098}} = 0{,}0244,$$

где $a$ =0,052
$b$ =0,098 (см. рис.5).

Потери напора на трение

$$h = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{W^2}{2g} = 0{,}0244 \cdot \frac{410 \cdot 10^3 \cdot 2{,}089^2}{0{,}7 \cdot 2 \cdot 9{,}8} = 3182\,м,$$

$$\Delta P = h \cdot \rho \cdot g = 3182 \cdot 840 \cdot 9{,}8 = 262 \cdot 10^7 \frac{Н}{м^2} = 267 \frac{кг}{см^2}.$$

3.3.По условиям примера 3.I определить расход нефти в трубопроводе при перепаде давления I20 кг/см$^2$.

Относительный радиус ядра течения

$$\bar{r}_0 = \frac{4\tau_0 L}{\Delta P D} = \frac{4 \cdot 2{,}402 \cdot 410 \cdot 10^3}{1{,}17 \cdot 10^5 \cdot 0{,}7} = 0{,}477,$$

$\bar{r}_{0кр}$=0,3I- режим течения ламинарный.

Расход в трубопроводе

$$Q = \frac{n\pi R^3}{(3n+1)K^{1/n}} \cdot \left(\frac{\Delta P R}{2L}\right)^{1/n} \left\{\beta\left[\sqrt{a^2 + \left(1 - \frac{P_0}{\Delta P}\right)^2} - a\right]\right\}^{1/n} = \frac{0{,}424 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}35}{(3 \cdot 0{,}424+1)\,1{,}27^{1/0{,}424}}$$

$$\left(\frac{1{,}17 \cdot 10^5 \cdot 0{,}35}{2 \cdot 410 \cdot 10^3}\right)^{1/0{,}424} \left\{1{,}2628\left[\sqrt{0{,}2358^2 + \left(1 - \frac{5{,}62 \cdot 10^4}{1{,}17 \cdot 10^5}\right)^2} - 0{,}2358\right]\right\}^{1/0{,}424} = 0{,}162 \frac{м}{с}$$

или производительность трубопровода $M$ =4,2 млн т/год.

3.4.По условиям варианта 3.I определить критическую скорость и критический расход в трубопроводе.

Критическая скорость

$$W_{кр}=\frac{16{,}2\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}{\sqrt{\frac{3}{2}\,\frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}\left[1-\frac{2n}{3n+1}\bar{\tau}_{0кр}\right]\bar{\tau}_{0кр}}}=$$

$$=\frac{16{,}2\sqrt{\frac{2402}{840}}}{\sqrt{\frac{3(3\cdot0{,}424+1)^2}{2(2\cdot0{,}424+1)(5\cdot0{,}424+3)}\left[1-\frac{2\cdot0{,}424}{3\cdot0{,}424+1}\,0{,}31\right]0{,}31}}=1{,}807\,\frac{м}{с}.$$

Критический расход

$$Q_{кр}=\frac{\pi D^2 W_{кр}}{4}=\frac{3{,}14\cdot0{,}7^2\cdot1{,}807}{4}=0{,}695\,\frac{м^3}{с}.$$

3.5. Определить диаметр трубопровода, необходимый для перекачки 18 млн.т/год нелинейновязкопластичной нефти при перепаде давления 120 кг/см$^2$. Длина трубопровода 410 км. Реологические параметры по условиям примера 3.1.

Ориентировочный радиус трубопровода

$$R_*=\left[\frac{Q(3n+1)}{n\pi}\left(\frac{2\kappa L}{\Delta P}\right)^{1/n}\right]^{n/3n+1}=$$

$$=\left[\frac{0{,}6889(3\cdot0{,}424+1)}{0{,}424\cdot3{,}14}\left(\frac{2\cdot1{,}271\cdot410\cdot10^3}{1{,}17\cdot10^5}\right)^{1/0{,}424}\right]^{\frac{0{,}424}{3\cdot0{,}424+1}}=0{,}3546м;$$

$$R_*=0{,}3546м,\quad D_{вн*}=0{,}709м.$$

Задается ряд условных значений диаметров, больших 0,7м

$$D_1=0{,}8м;\quad D_2=0{,}9м;\quad D_3=1{,}0м.$$

Результаты расчетов сводятся в таблицу. По данным таблицы строится график зависимости перепада давления от диаметра. Режим для всех диаметров ламинарный. Все точки соединяются плавной кривой. Откладывается заданный перепад давления $\Delta P=120\,\frac{кг}{см^2}$ и проводится параллельная оси $D$ прямая пересечения с кривой. Точка пересечения определяет необходимый диаметр (рис.7).

Результаты расчетов примера 3.5

| $D$, м | $w_1$, м/с | $И'$ | $He$ | $\bar{F}_o$ | $Re^*$ | $Re^*_{кр}$ | $\bar{F}_{o\,кр}$ | $\Delta P$, $\frac{Н}{м^2}$ | $\Delta P$, $\frac{кг}{см^2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,8 | I,370 | 4,4 | $5,88.10^5$ | 0,33 | I4I9 | 2359 | 0,3I | $I,49I.10^5$ | I52 |
| 0,9 | I,083 | 5,3 | $7,44.10^5$ | 0,37 | I347 | 2386 | 0,33 | $I,I77.10^5$ | I20 |
| I,0 | 0,878 | 5,8 | $9,I8.10^5$ | 0,39 | 6I0 | 24I3 | 0,34 | $I,0I.10^5$ | I03 |

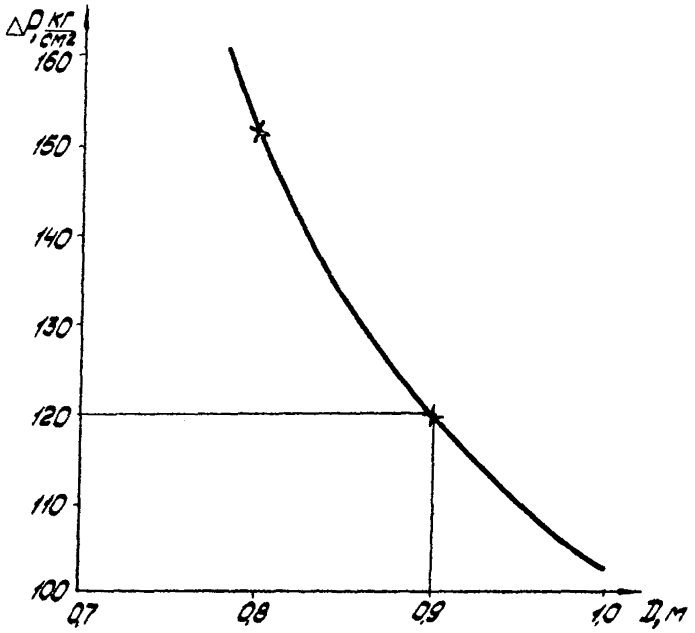


Рис.7. Зависимость перепада давления от диаметра трубопровода

Уточняется величина перепада давления для принятого значения диаметра.

В данном примере принят диаметр $D_{вн}$=0,9м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I. Тонкошкуров Б.А., Юдахина Е.М. Исследование неньютоновских свойств некоторых нефтепродуктов на ротационных вискозиметрах. Труды ВНИИСПТнефти , вып.IO,I972.

2. Herschell W.H., Bulkley R. Kolloid-Zeitsen, 39291, 1926

3. Skelland A.H.R. Non-Newtonian Flow and Heat Transfer. New-Yourk, London, Sydney, 1967.

4. Черникин В.И. Перекачка вязких и застывающих нефтей, М.,Гостоптехиздат,I958.

5. Яблонский В.С., Новоселов В.Ф. и др. Проектирование, эксплуатация и ремонт нефтепродуктопроводов. Изд. "Недра",М., I965.

6. Уилкинсон У.Д. Неньютоновские жидкости. М.,"Мир",1964.

7. Губин В.Е., Тонкошкуров Б.А. Критические параметры потока при течении нелинейновязкопластичных нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам. Труды ВНИИСПТнефти , вып.I2,I974.

8. Тонкошкуров Б.А. Расчет трубопроводов при турбулентном течении нелинейновязкопластичных нефтей. Труды ВНИИСПТнефти , вып.I6,I976.

СОДЕРЖАНИЕ


| | Стр. |
|---|---|
| I. Общие положения | 3 |
| 2. Гидравлический расчет | 9 |
| 2.I. Ламинарный режим течения | 9 |
| 2.2. Определение границы существования ламинарного режима | I3 |
| 2.3. Турбулентный режим течения | I6 |
| 3. Примеры расчетов | I8 |
| Список литературы | 29 |

МЕТОДИКА

гидравлического расчета магистральных нефтепроводов при изотермическом режиме течения нелинейновязкопластичных нефтей

РД 39-30-40-78

ВНИИСПТнефть

450055, г.Уфа-55, просп.Октября,144/3

Редактор В.З.Беспалова

Подписано в печать 18.04.1978. П03291

Формат 60х84 1/16. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 460 экз.

Цена 8 коп. Заказ 82

Ротапринт ВНИИСПТнефти

gost.e-ecolog.ru