

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВНИИСПТ<sub>нефть</sub>

**МЕТОДИКА**  
**ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА**  
**МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ**  
**ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ**  
**НЕЛИНЕЙНОВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ НЕФТЕЙ**  
**РД 39 - 30 - 40 - 78**

Министерство нефтяной промышленности  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СБОРУ,  
ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТУ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ (ВНИИСПНефть)

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

МЕТОДИКА  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МАГИСТРАЛЬНЫХ  
НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ  
ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ НЕФТЕЙ

РД 89-30-40-78

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 ВНИИСПНефти и литературные рекомендации, подтвержденные экспериментами.

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

"Методика..." составлена к.т.н. Тонкошуровым 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.1. 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 [1].

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

1.2.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.

1.3.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<sup>3</sup>/с;

$W$  - скорость течения, м/с;

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

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

$\tau$  - напряжение сдвига, н/м<sup>2</sup>;

$\tau_w$  - напряжение сдвига на стенке, н/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления;

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

$\frac{dw}{dr}$  - градиент скорости на радиусе  $r$ , с<sup>-1</sup>;

$n$  - степень неньютоновского поведения жидкости;

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

$h$  - потери напора на трение, м.

Параметры:

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

- параметр Ильюшина для нелинейно-вязкопластичной жидкости;

$$\Delta P_0 = \frac{4 \tau_0 L}{D}$$

- давление сдвига для вязкопластичной жидкости;

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

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

$$Re_{кр}^* = \frac{2100}{1 - \frac{2n}{3n+1} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)_{кр}}$$

- критическое значение обобщенного параметра Рейнольдса;

$$Re' = \frac{D^n W^{2-n} \rho}{\frac{\kappa (6n+2)}{8} \left( \frac{\tau_0}{n} \right)^n}$$

- параметр Рейнольдса для степенной жидкости (псевдопластика);

$$Re_c = \frac{D^n W^{2-n} \rho}{\frac{\kappa (6n+2)}{8} \left( \frac{\tau_0}{n} \right)^n} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$

- обобщенный параметр Рейнольдса для степенной жидкости (псевдопластика),

1.4. Для выполнения расчетов по методике необходимы следующие исходные данные:

а) производительность перекачки -  $M$  ;

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

- в) длина трубопровода -  $l$  ;
- 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.

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

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

Результаты вискозиметрических исследований представляются в виде равновесных кривых течения (рис.1), выражающих зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига.

Степень неньютоновского поведения "  $n$  " и мера консистентности "  $K$  " определяются по кривым течения (см.рис.1). Составляется уравнение по закону Балкли-Гершеля для двух скоростей сдвига, т.е.

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

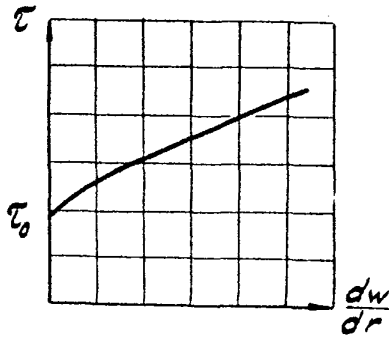


Рис.1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига

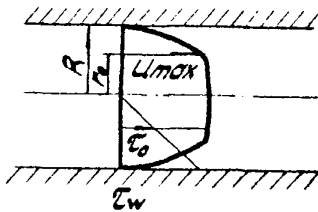


Рис.2. Профиль скорости при течении нелинейно-вязкопластичной жидкости



и решается относительно "  $\kappa^0$  " и "  $\rho$  " .

1.6. Профиль скорости при течении нелинейной вязкопластичных жидкостей имеет вид (рис.2) и описывается уравнением

$$W = \int_0^R f(\tau) dr = \frac{1}{\kappa^{1/n}} \cdot \frac{R}{\tau_w} \cdot \frac{\rho}{\rho+1} \left[ (\tau_w - \tau_0)^{1+\frac{1}{n}} - (\tau_w \cdot \frac{r}{R} - \tau_0)^{1+\frac{1}{n}} \right] \quad (2)$$

где  $R$  - радиус трубы, м;

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

При этом скорость ядра потока вычисляется по формуле

$$W_0 = \frac{1}{\kappa^{1/n}} \cdot \frac{\rho}{\rho+1} R \tau_w^{1/n} \left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^{1+\frac{1}{n}} \quad (3)$$

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

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

а средняя скорость

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

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

## 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

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

### 2.1. 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

$$\frac{\tau_0}{\tau_w} = \frac{\Delta P_0}{\Delta P} = \frac{r_0}{r}, \quad (7)$$

где

$$\frac{r_0}{R} = \frac{1}{1 + \frac{8}{3n+1} \left[ n + \sqrt{(2n+1)^2 + \frac{16}{4} n(3n+1)} \right]}. \quad (8)$$

Перепад давления в трубопроводе определяется по формуле [4]

$$\Delta P = \frac{4\tau_w L}{D}, \quad (9)$$

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

$$\Delta P = \frac{4\tau_0 R L}{r_0 D}, \quad (9)^a$$

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

$$\Delta P = \frac{4\gamma_0 L}{\tilde{\rho}_0 D} . \quad (10)$$

Если учесть, что  $\tilde{\rho}_0$  выражается уравнением (8), а

$$\Delta P_0 = \frac{4\gamma_0 L}{D} , \quad (11)$$

вместо (9) получится выражение

$$\Delta P = \Delta P_0 \left( 1 + \frac{\alpha}{\beta} \frac{g}{v'} + \sqrt{\frac{\alpha^2 + 1}{\beta} \frac{g^2}{v'^2} + 2 \frac{\alpha}{\beta} \frac{g}{v'}} \right) , \quad (12)$$

где

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

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]

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (z_1 - z_2) , \quad (13)$$

$$l = \frac{h}{L} , \quad (14)$$

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:

$$Q = \frac{n\pi R^3}{(3n+1)\kappa^{1/n}} \left( \frac{\Delta P R}{2L} \right)^{1/n} \left\{ \beta \left[ \sqrt{\alpha^2 + \left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta D}\right)^2} - \alpha \right] \right\}^{1/n}. \quad (15)$$

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

$$R = \left[ \frac{Q(3n+1)}{n\pi} \cdot \left( \frac{2\kappa L}{\Delta D} \right)^{1/n} \right]^{n/(3n+1)}. \quad (16)$$

Задаются 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 не-ньютоновских жидкостей, параметр Рейнольдса в ней должен быть

обобщенным

$$\lambda = \frac{64}{Re^n}, \quad (17)$$

а при учете **нелинейновязкопластичных свойств жидкости**

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

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

При подстановке зависимости (13) в формулу Дарси-Вейсбаха

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

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

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

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

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

Таким образом,

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

## 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)

$$Ne_{\epsilon} = \frac{2100 (\bar{v}_{кр})^{\frac{2-n}{n}}}{\left[1 - \frac{2n}{3n+1} \bar{v}_{кр}\right] \left\{ \left[1 - \bar{v}_{кр}\right]^{+1/n} \left[1 + \frac{2n}{2n+1} \bar{v}_{кр} + \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \bar{v}_{кр}^2\right]^2 \right\}}, \quad (22)$$

где

$Ne_{\epsilon}$  - критерий Хедстрема для нелинейновязкопластика;

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

Критическая скорость ламинарного потока рассчитывается по формуле [7]

$$W_{кр} = \frac{162 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}{\sqrt{\frac{3}{2} \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)} \left[1 - \frac{2n}{3n+1} \bar{v}_{кр}\right] \bar{v}_{кр}}}. \quad (23)$$

При значениях  $\bar{v}_{кр} = 1$  и  $n = 0$  (поршневое течение)

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

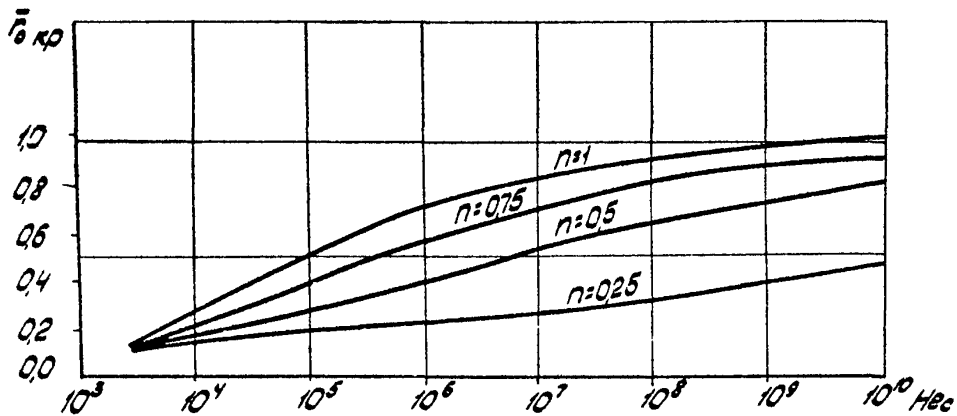


Рис.3. Зависимость критического радиуса ядра потока от параметра Хедстрема

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]:

$$Re_{кр}^* = \frac{2100}{1 - \frac{2n}{3n+1} \bar{v}_{0кр}} \quad (24)$$

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

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

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



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

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

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 "  $\Pi$  ". Только действительный параметр Рейнольдса  $Re_a$  позволяет однозначно определить границу перехода ламинарного течения к турбулентному.

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

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

где

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

### 2.3. Турбулентный режим течения

При турбулентном режиме течения вязкопластичной жидкости коэффициент гидравлического сопротивления можно рассчитывать

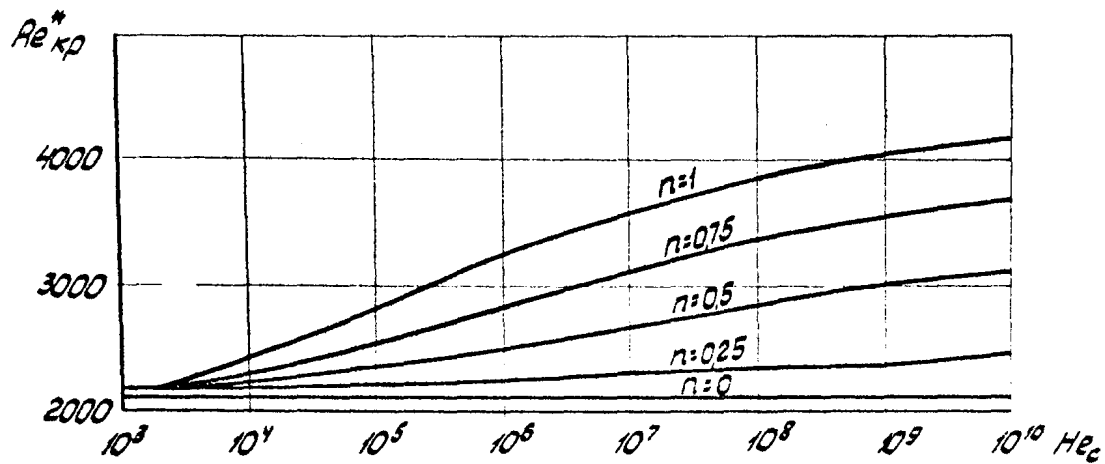


Рис. 4. Зависимость  $Re_{кр}$  от  $He_c$ .

по формуле [7]

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

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

3.1. Определить перепад давления в трубопроводе диаметром 720x10 и длиной 410 км. По трубопроводу перекачивается нелинейновязкопластичная жидкость с  $\rho = \frac{840 \text{ кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\tau = 2,402 \text{ н/м}^2$  (рис.6),  $n = 0,424$ ,  $K = 1,272 \frac{\text{н} \cdot \text{с}^n}{\text{м}^2}$ , годовой производительностью  $M = 2,5$  млн т/год.

Средняя скорость потока

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

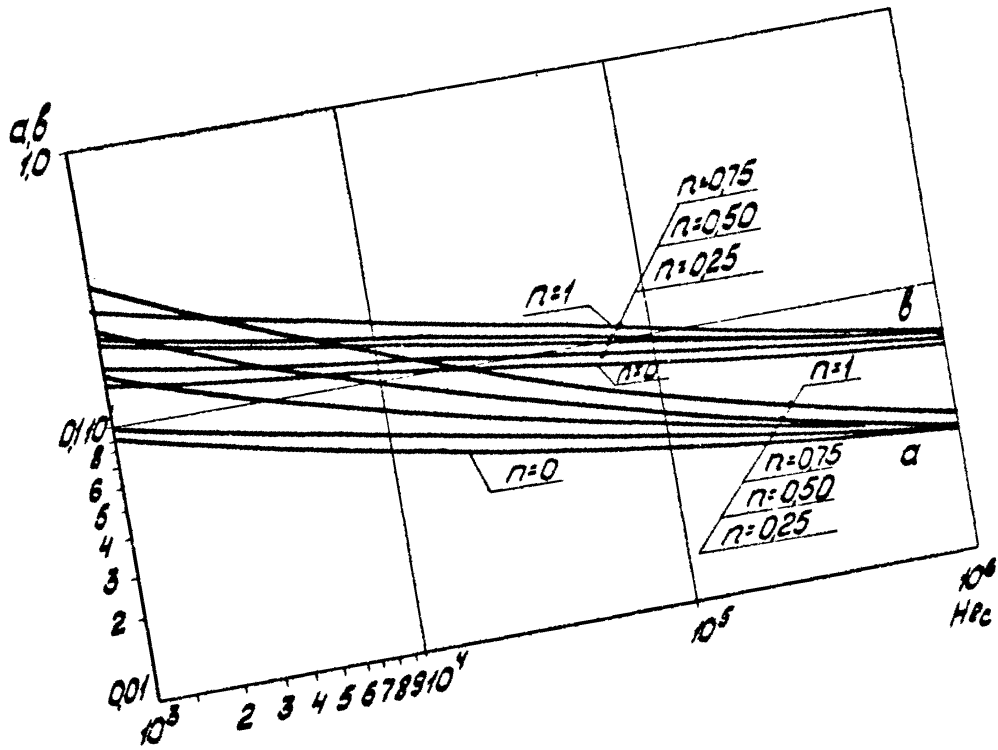


Рис.5. Значения коэффициентов "а" и "б" в зависимости от  $He_c$  и "n"

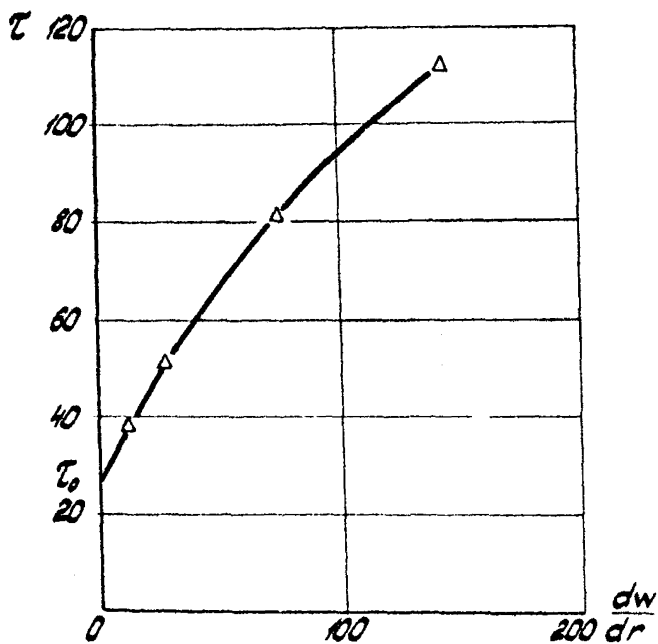


Рис.6. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для нелинейновязкопластичной нефти

Параметр Ильюшина

$$И' = \frac{\tau_0 D^n}{\kappa (6n+2)^n W^n} = \frac{2,402 \cdot 07^{9,424}}{\frac{1271}{8} \left( \frac{6 \cdot 0,424 + 2}{0,424} \right)^{9,424} \cdot 0,249^{9,424}} = 967.$$

Параметр Хедстрема

$$Ne = \frac{\tau_0^n \cdot D \cdot \rho}{\left[ \frac{\kappa (6n+2)^n}{8} \right]^{2/n}} \cdot \frac{3 \cdot (3n+1)^2}{2(2n+1)(5n+3)} = \frac{2,402^{9,424} \cdot 07^2 \cdot 840}{\left[ \frac{1271}{8} \left( \frac{6 \cdot 0,424 + 2}{0,424} \right)^{9,424} \right]^{2/9,424}} \cdot \frac{3 \cdot (3 \cdot 0,424 + 1)^2}{2 \cdot (2 \cdot 0,424 + 1) \cdot (5 \cdot 0,424 + 3)} = 4,5 \cdot 10^5.$$

Относительный радиус ядра потока

$$\bar{r}_0 = \frac{И'}{И' + \frac{8}{3n+1} \left[ n + \sqrt{(2n+1)^2 + \frac{И'}{4} n (3n+1)} \right]} = \frac{967}{967 + \frac{8}{3 \cdot 0,424 + 1} \left[ 0,424 + \sqrt{(2 \cdot 0,424 + 1)^2 + \frac{967}{4} \cdot 0,424 (3 \cdot 0,424 + 1)} \right]} = 0,5.$$

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

$$\Delta P_0 = \frac{4 \tau_0 L}{D} = \frac{4 \cdot 2,402 \cdot 410 \cdot 10^3}{0,7} = 5,62 \cdot 10^6 \frac{Н}{м^2} \text{ или } 57,36 \frac{кг}{см^2},$$

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

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

$$\Delta P = 562 \cdot 10^6 \left( 1 + \frac{0,2358}{1,2628} \cdot \frac{8}{967} + \sqrt{\frac{0,2358^2 + 1}{1,2628^2 \cdot 967^2} + 2 \cdot \frac{0,2358}{1,2628} \cdot \frac{8}{967}} \right) =$$

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

3.2. По условиям примера 3.1 выполнить расчеты для  
 $M=2$  млн т/год.

Средняя скорость потока

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

Параметр Ильшина

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

Параметр Хедстрема

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

Относительный радиус ядра потока

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

$$\bar{r}_{0кр} = 0,31,$$

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

Обобщенное число Рейнольдса

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

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

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

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

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

$$\cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(3 \cdot 0,424+1)^2}{(2 \cdot 0,424+1)(5 \cdot 0,424+3)} = 2219.$$



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

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

$$\Delta P = h \cdot \rho \cdot g = 3182 \cdot 840 \cdot 9,8 = 2,62 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 267 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

3.3. По условиям примера 3.1 определить расход нефти в трубопроводе при перепаде давления 120 кг/см<sup>2</sup>.

Относительный радиус ядра течения

$$\bar{r}_0 = \frac{4C_0 L}{\Delta P D} = \frac{4 \cdot 2,402 \cdot 410 \cdot 10^3}{117 \cdot 10^5 \cdot 0,7} = 0,477,$$

$\bar{r}_{0кр} = 0,31$  - режим течения ламинарный.

Расход в трубопроводе

$$Q = \frac{\pi \pi R^3}{(3n+1)\kappa^{1/n}} \cdot \left( \frac{\Delta P R}{2L} \right)^{1/n} \left\{ \beta \left[ \sqrt{\alpha^2 + \left(1 - \frac{\rho_0}{\Delta \rho}\right)^2} - \alpha \right] \right\}^{1/n} = \frac{0,424 \cdot 314 \cdot 0,35}{(3 \cdot 0,424 + 1) \cdot 1,271^{1/0,424}} \cdot \left( \frac{117 \cdot 10^5 \cdot 0,35}{2 \cdot 410 \cdot 10^3} \right)^{1/0,424} \left\{ 1,2628 \left[ \sqrt{0,2358^2 + \left(1 - \frac{562 \cdot 10^4}{117 \cdot 10^5}\right)^2} - 0,2358 \right] \right\}^{1/0,424} = 0,162 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

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

3.4. По условиям варианта 3.1 определить критическую скорость и критический расход в трубопроводе.

Критическая скорость

$$W_{кр} = \frac{16,2 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}}{\sqrt{\frac{3}{2} \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)} \left[1 - \frac{2n}{3n+1} \bar{\rho}_{кр}\right] \bar{\rho}_{кр}}} =$$

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

Критический расход

$$Q_{кр} = \frac{\pi D^2 W_{кр}}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 1,807}{4} = 0,695 \frac{м^3}{с}.$$

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

Ориентировочный радиус трубопровода

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

$$= \left[ \frac{0,6889(3 \cdot 0,424+1)}{0,424 \cdot 3,14} \left( \frac{2 \cdot 1271 \cdot 410 \cdot 10^3}{1,17 \cdot 10^5} \right)^{1/0,424} \right]^{1/3 \cdot 0,424+1} = 0,3546 м;$$

$$R_* = 0,3546 м, \quad D_{6м} = 0,709 м.$$

Задается ряд условных значений диаметров, больших 0,7 м

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

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

$D, м$	$w, м/с$	$\lambda'$	$He$	$\bar{r}_0$	$Re^*$	$Re_{кр}^*$	$\bar{r}_{0,кр}$	$\Delta P, \frac{H}{м^2}$	$\Delta P, \frac{кг}{см^2}$
0,8	1,370	4,4	$5,88 \cdot 10^5$	0,33	1419	2359	0,31	$1,491 \cdot 10^5$	152
0,9	1,083	5,3	$7,44 \cdot 10^5$	0,37	1347	2386	0,33	$1,177 \cdot 10^5$	120
1,0	0,878	5,8	$9,18 \cdot 10^5$	0,39	610	2413	0,34	$1,01 \cdot 10^5$	103

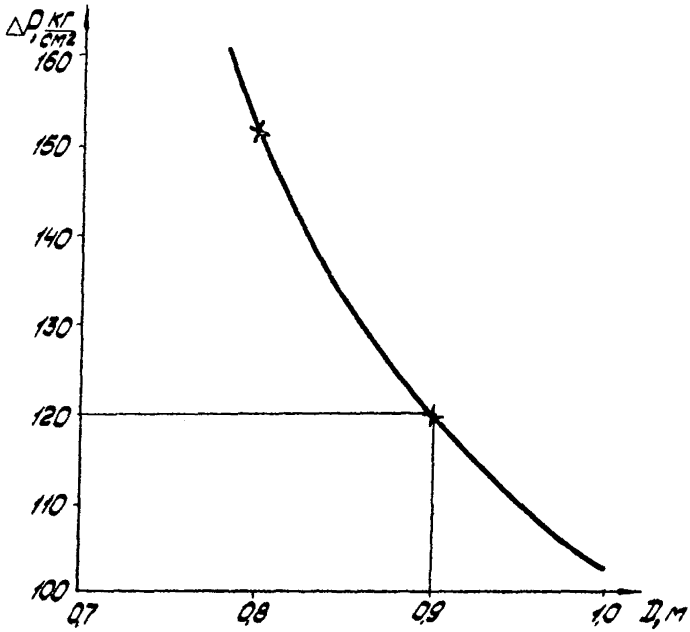


Рис. 7. Зависимость перепада давления от диаметра трубопровода

стр.28 РД 39-30-40-78

Уточняется величина перепада давления для принятого значения диаметра.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тонкошуров Б.А., Юдахина Е.М. Исследование не-newтоновских свойств некоторых нефтепродуктов на ротационных вискозиметрах. Труды ВНИИСПНефти, вып.10,1972.
2. *Herschell W.H. Bulkley, 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,1958.
5. Яблонский В.С., Новоселов В.Ф. и др. Проектирование, эксплуатация и ремонт нефтепродуктопроводов. Изд. "Недра",М., 1965.
6. Уилкинсон У.Д. Ньютоновские жидкости. М., "Мир",1964.
7. Губин В.Е., Тонкошуров Б.А. Критические параметры потока при течении нелинейновязкопластичных нефтей и нефтепродуктов по трубопроводам. Труды ВНИИСПНефти, вып.12,1974.
8. Тонкошуров Б.А. Расчет трубопроводов при турбулентном течении нелинейновязкопластичных нефтей. Труды ВНИИСПНефти, вып.16,1976.

СОДЕРЖАНИЕ	Стр.
1. Общие положения	<u>3</u>
2. Гидравлический расчет	<u>9</u>
2.1.Ламинарный режим течения	<u>9</u>
2.2.Определение границы существования ламинарного режима	<u>13</u>
2.3.Турбулентный режим течения	<u>16</u>
3. Примеры расчетов	<u>18</u>
Список литературы	<u>29</u>

## МЕТОДИКА

гидравлического расчета магистральных  
нефтепроводов при изотермическом режиме  
течения нелинейновязкопластичных нефтей  
РД 39-30-40-78

ВНИИСПНефть

450055, г.Уфа-55, просп. Октября, 144/3

Редактор В.З.Беспалова

---

Подписано в печать 18.04.1978. П0329Г  
Формат 60x84 1/16. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 460 экз.  
Цена 8 коп. Заказ 82

---

Ротапринт ВНИИСПНефти