

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВНИИСПТ_{нефть}

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, м³/с;

W - скорость течения, м/с;

ρ - плотность, кг/м³;

ΔP - потери давления на трение, н/м², кг/см²;

τ - напряжение сдвига, н/м²;

τ_w - напряжение сдвига на стенке, н/м²;

λ - коэффициент гидравлического сопротивления;

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

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

n - степень неньютоновского поведения жидкости;

K - мера консистенности 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;

$$He = \frac{\tau^n D^2 \rho \cdot 3}{\left[\frac{\kappa(6n+2)}{8}\right]^{\frac{2}{n}} 2} \cdot \frac{(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$$

- критерий Хедстрема для нелинейновязкопластичной жидкости;

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

- 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;

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

- параметр Рейнольдса для степенной жидкости (псевдопластика);

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

- обобщенный параметр Рейнольдса 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 - ΔP ;
- 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.

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

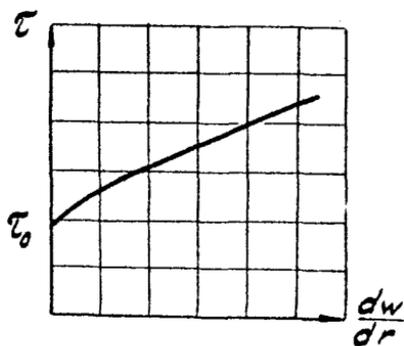


Рис.1. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига

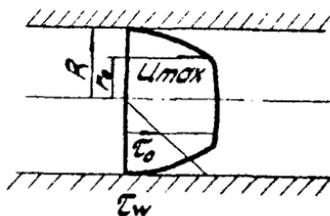


Рис.2. Профиль скорости при течении нелинейно-вязкопластичной жидкости

и решается относительно " κ^o " и " ρ " .

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

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

где R - радиус трубы, м;

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

При этом скорость ядра потока вычисляется по формуле

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

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

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

а средняя скорость

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

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

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 τ_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:

$$\Delta P = \frac{4\zeta_0 L}{\tilde{\rho}_0 D} . \quad (10)$$

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

$$\Delta P_0 = \frac{4\zeta_0 L}{D} , \quad (11)$$

вместо (9) получится выражение

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

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:

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

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

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

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 λ 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**

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

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:

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

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

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

Таким образом,

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

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)

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

где

Ne_c - критерий Хедстрема для нелинейновязкопластика;

$\bar{v}_{кр}$ - определяется из рисунка 8, на котором представлен график изменения $\bar{v}_{кр}$ от величины Хедстрема Ne_c и n . При определении $\bar{v}_{кр}$ следует считать, что для значения $\bar{v}_0 > \bar{v}_{кр}$ режим течения будет ламинарным, а для $\bar{v}_0 < \bar{v}_{кр}$ - 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)

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

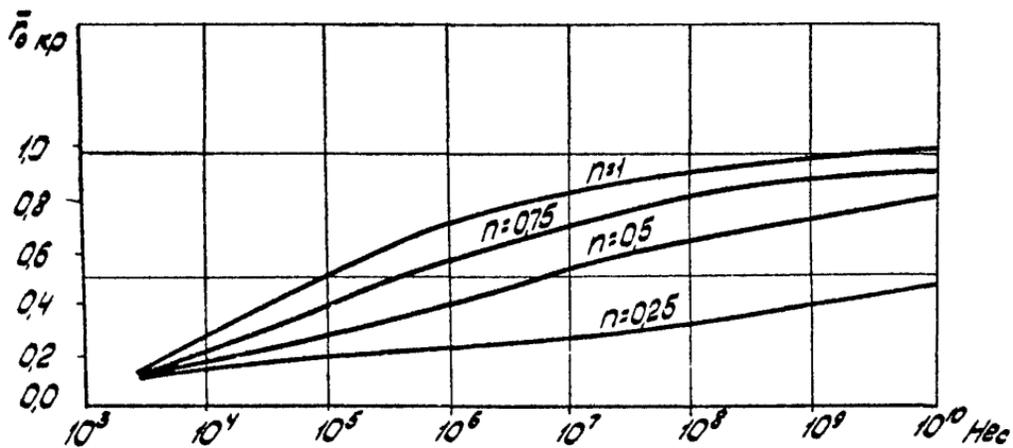


Рис.3. Зависимость критического радиуса ядра потока от параметра Хедстрема

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 " Π ". 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

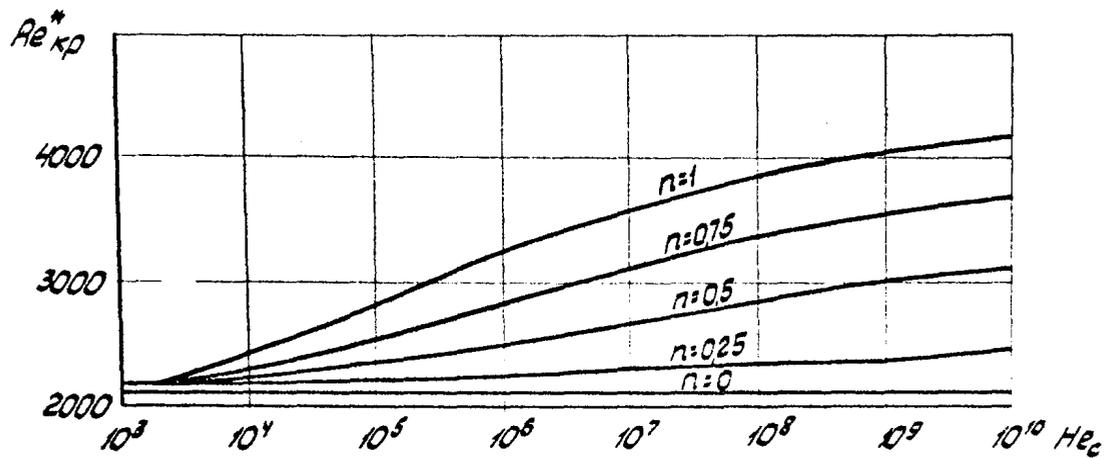


Рис. 4. Зависимость $Re_{кр}$ от He_c .

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

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

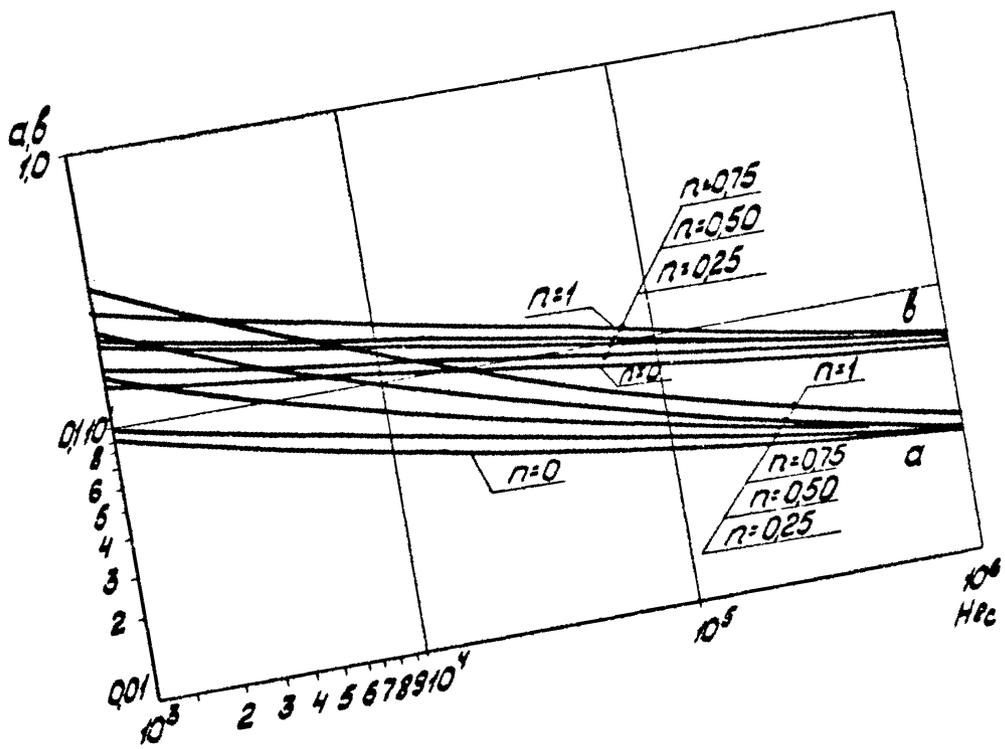


Рис.5. Значения коэффициентов "а" и "б" в зависимости от He_c и "n"

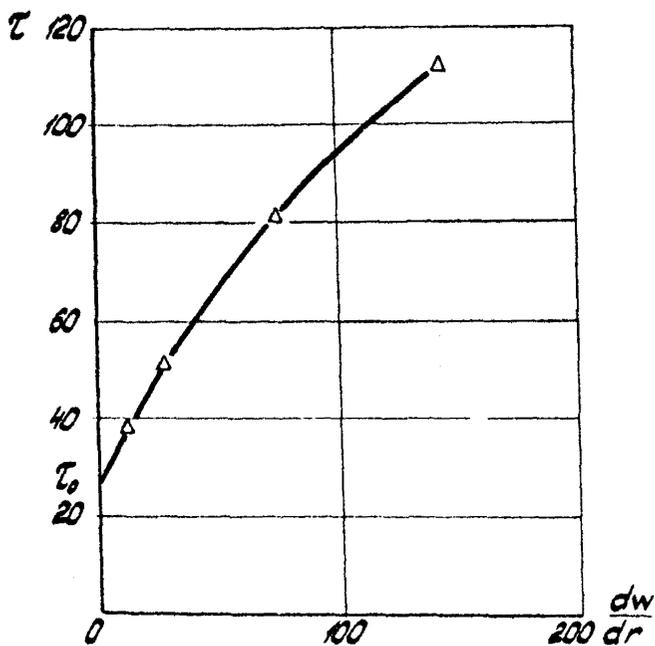


Рис.6. Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для нелинейновязкопластичной нефти

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

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

Относительный радиус ядра потока

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \Delta P &= 562 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{0,2358}{1,2628} \cdot \frac{8}{967} + \sqrt{\frac{0,2358^2 + 1}{1,2628^2 \cdot 967^2} + 2 \cdot \frac{0,2358}{1,2628} \cdot \frac{8}{967}} \right) = \\ &= 1,14 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 116,18 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

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

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

$$\bar{r}_{\text{кр}} = 0,31,$$

$\bar{r}_0 = \bar{r}_{\text{кр}}$ - 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

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

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/см².

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/см². 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 0,7м

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

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

$D, \text{м}$	$w, \text{м/с}$	λ'	He	\bar{r}_0	Re^*	$Re_{кр}^*$	$\bar{r}_{0,кр}$	$\Delta P, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$\Delta P, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$
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

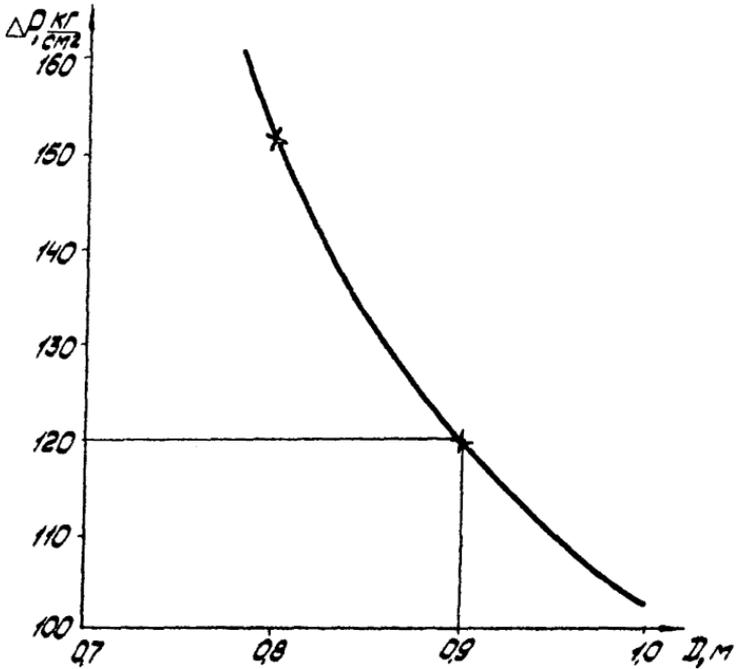


Рис. 7. Зависимость перепада давления от диаметра трубопровода

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-York, 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