

Содержание

1	Прогнозирование режима потока	1
2	Градиент давления на трение	4
3	Градиент давления на гравитацию	9
4	Общий градиент давления	12
5	Значение давления в трубе (интегрирование градиента)	13

1 Прогнозирование режима потока

Известны следующие параметры:

$q_o = 1590$ ст.м³/сутки – дебит нефти

$q_g = 283$ тыс.м³/сутки – дебит газа

$q_w = 0$ ст.м³/сутки – дебит воды

$B_o = 1.197$ м³/ст.м³ – объемный коэффициент нефти

$B_g = 0.0091$ м³/ст.м³ – объемный коэффициент газа

$B_w = 1$ м³/ст.м³ – объемный коэффициент воды

$R_s = 50.6$ ст.м³/ст.м³ – учитывает растворение газа в нефти (конденсацию) или выделение газа из нефти (выкипание)

$R_{sw} = 1$

$\rho_{o.n.y.} = 800$ кг/м³

$\rho_{g.n.y.} = 700$ кг/м³

$\rho_{w.n.y.} = 1000$ кг/м³

$d = 0.1524$ м – диаметр трубы

$g = 9.81$ м/с² – const

$\sigma_o = 8.41$ мН/м = $8.41 \cdot 10^{-3}$ кг/с² – поверхностное натяжение нефти

$\rho_L = 762.64$ кг/м³ – плотность жидкости

$\rho_g = 94.16$ кг/м³ – плотность газа

$\mu_o = 0.97$ сП = $0.97 \cdot 10^{-3}$ Па · с – вязкость нефти

$\varepsilon = 18.288 \cdot 10^{-6}$ м – абсолютная шероховатость трубы

$L = 2000$ м – длина скважины

Входными параметрами являются:

- дебит жидкости $q_{l.n.y.}$ - ст.м³/сутки,
- обводненность WC - доли,
- газовый фактор R_s - ст.м³/ст.м³.

Объемные дебиты нефти, воды, газа (делим на $24 \cdot 60 \cdot 60$ с/сутки, что бы перейти в СИ)

$$q_o = \frac{q_{l_{н.у.}} \cdot (1 - WC)}{86400} B_o \quad (3.1)$$

$$q_w = \frac{q_{l_{н.у.}} \cdot WC}{86400} B_w \quad (3.2)$$

$$q_L = q_o + q_w$$

$$q_g = \frac{(q_{l_{н.у.}} \cdot (1 - WC) \cdot R_s)}{86400} B_g \quad (3.3)$$

$$\sigma_L = \sigma_o \cdot (1 - WC) + \sigma_w \cdot WC$$

$$\mu_L = \mu_o \cdot (1 - WC) + \mu_w \cdot WC$$

$$\rho_g = \rho_{g_{н.у.}} / R_s$$

$$\rho_L = \rho_{o_{н.у.}} \cdot (1 - WC) / B_o + \rho_{w_{н.у.}} \cdot WC / B_w$$

Приведенные скорости жидкости и газа а единицу поперечного сечения трубы

$$v_{SL} = \frac{q_L}{A_p} \quad (3.10)$$

$$v_{Sg} = \frac{q_g}{A_p} \quad (3.11)$$

$$A_p = \pi \cdot r^2 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \frac{d^2}{4}$$

Рассчитать приведенные скорости жидкости и газа:

$$A_p = \pi \frac{d^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot 0.1524^2 \text{ м}^2 = 0.0182 \text{ м}^2$$

$$q_o = \frac{1590 \text{ ст.м}^3/\text{сутки} \cdot \frac{283 \text{ тыс.м}^3/\text{сутки}}{1590 \text{ ст.м}^3/\text{сутки} \cdot 178 \text{ м}^3/\text{ст.м}^3}}{86400 \text{ с/сутки}} \cdot 1.197 \text{ м}^3/\text{ст.м}^3 = 0.022 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$q_w = \frac{q_{w_{н.у.}}}{86400} B_w = 0$$

$$q_L = q_o + q_w = 0.022 \text{ м}^3/\text{сутки} + 0 = 0.022 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$q_g = \frac{(283 \text{ тыс.м}^3/\text{сутки} - 1590 \text{ ст.м}^3/\text{сутки} \cdot 50.6 \text{ ст.м}^3/\text{ст.м}^3 - 0)}{86400 \text{ с/сутки}} \cdot 0.0091 \text{ м}^3/\text{ст.м}^3$$

$$= 0.0214 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$v_{SL} = \frac{q_L}{A_p} = \frac{0.022 \text{ м}^3/\text{с}}{0.0182 \text{ м}^2} = 1.21 \text{ м/с}$$

$$v_{Sg} = \frac{q_g}{A_p} = \frac{0.0214 \text{ м}^3/\text{с}}{0.0182 \text{ м}^2} = 1.176 \text{ м/с}$$

Рассчитаем четыре безразмерные группы величин:

1. Показатель скорости жидкости:

$$N_{Lv} = v_{SL} \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}} \quad (4.3)$$

2. Показатель скорости газа:

$$N_{gv} = v_{Sg} \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}} \quad (4.4)$$

3. Показатель диаметра трубы:

$$N_d = d \sqrt{\frac{g\rho_L}{\sigma_L}} \quad (4.5)$$

4. Показатель вязкости жидкости:

$$N_L = \mu_L \sqrt[4]{\frac{g}{\rho_L \sigma_L^3}} \quad (4.6)$$

Рассчитать четыре безразмерные группы величин :

$$N_{Lv} = v_{SL} \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}} = 1.21 \text{ м/с} \left(\frac{762.64 \text{ кг/м}^3}{9.8 \text{ м/с}^2 \cdot 8.41 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}^2} \right)^{0.25} = 11.87 \text{ б/р}$$

$$N_{gv} = v_{Sg} \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}} = 1.176 \text{ м/с} \left(\frac{762.64 \text{ кг/м}^3}{9.8 \text{ м/с}^2 \cdot 8.41 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}^2} \right)^{0.25} = 11.54 \text{ б/р}$$

$$N_d = d \sqrt{\frac{g\rho_L}{\sigma_L}} = 0.152 \text{ м} \sqrt{\frac{762.64 \text{ кг/м}^3 \cdot 9.8 \text{ м/с}^2}{8.41 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}^2}} = 143.8 \text{ б/р}$$

$$N_L = \mu_L \sqrt[4]{\frac{g}{\rho_L \sigma_L^3}} = 0.97 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} \left(\frac{9.8 \text{ м/с}^2}{762.64 \text{ кг/м}^3 \cdot (8.41 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}^2)^3} \right)^{0.25} = 0.0118 \text{ б/р}$$

По рисунку 4.6 определяем L_1 и L_2 – зависимости от N_d .

График превратили в матрицу, состоящую из двух массивов точек $[[X][Y]]$. Бинарным поиском находим в $[X]$ интервал, в который попадает значение N_d . Затем берем среднее арифметическое концов выбранного отрезка на оси значений $[Y]$ - это будет значение графика в точке N_d .

На рисунке 4.5 показаны четыре режима потока в зависимости от показателя скорости жидкости N_{Lv} и газа N_{gv}

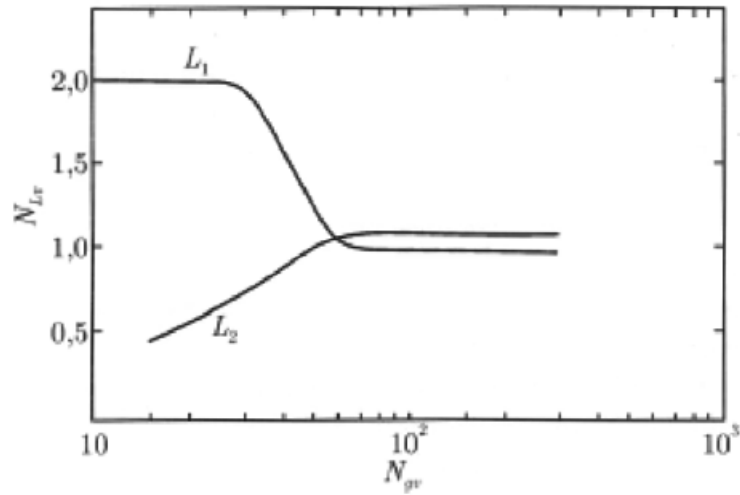


Рис. 4.6. Параметры, характеризующие переход из пузырькового в пробковый режим потока по методу Данса и Роса

1. Пузырьковый режим, если $10^{-1} < N_{gv} \leq L_1 + L_2 \cdot N_{Lv}$
2. Пробковый режим, если $L_1 + L_2 \cdot N_{Lv} < N_{gv} \leq 50 + 36 \cdot N_{Lv}$
3. Переходный режим, если $50 + 36 \cdot N_{Lv} < N_{gv} \leq 75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}$
4. Эмульсионный режим, если $75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75} < N_{gv} \leq 10^3$

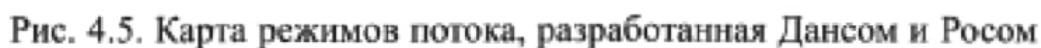
По рисунку 4.6 видим, что при $N_d = 146.8$ параметры равны $L_1 = 1$, $L_2 = 1.1$. Проверяем к какой режим потока в нашем случае

1. Пузырьковый режим, если $10^{-1} < 11.54 \leq 1 + 1.1 \cdot 11.87 = 14 \rightarrow$ да
2. Пробковый режим, если $14 = 1 + 1.1 \cdot 11.87 < 11.54 \leq 50 + 36 \cdot 11.87 = 477 \rightarrow$ нет
3. Переходный режим, если $477 = 50 + 36 \cdot 11.87 < 11.54 \leq 75 + 84 \cdot 11.87^{0.75} = 612 \rightarrow$ нет
4. Эмульсионный режим, если $612 = 75 + 84 \cdot 11.87^{0.75} < 11.54 \leq 10^3 \rightarrow$ нет

2 Градиент давления на трение

Составляющая градиента давления по трению определяется в зависимости режима потока

1. Пузырьковый режим


$$N_{ReL} = \frac{\rho_L \cdot v_{SL} \cdot d}{\mu_L} \quad (4.41)$$
$$\frac{\varepsilon}{d}$$
$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2 \lg \left(\frac{2\varepsilon}{3.7d} - \frac{5.02}{N_{ReL}} \cdot \lg \left(\frac{2\varepsilon}{3.7d} + \frac{13}{N_{ReL}} \right) \right) \quad (2.19)$$
$$\frac{f_1 \cdot v_{Sg} \cdot N_d^{2/3}}{4 \cdot v_{SL}}$$
$$f_3 = 1 + \frac{f_1}{4} \sqrt{\frac{v_{Sg}}{50 \cdot v_{SL}}} \quad (4.42)$$

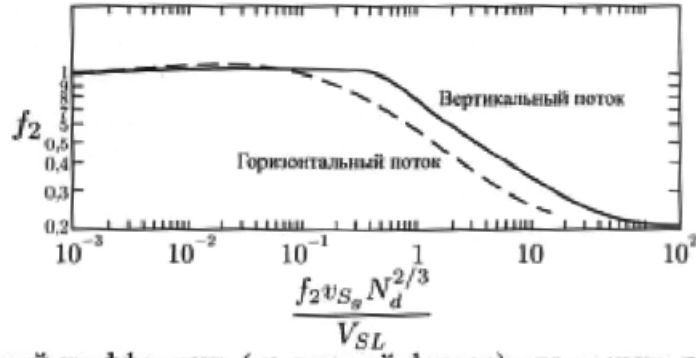


Рис. 4.8. Поправочный коэффициент (на газовый фактор) для расчета трения в пузырьковом режиме потока по методу Данса и Роса

Получаем значение коэффициента трения

$$f = f_1 \frac{f_2}{f_3} \quad (4.40)$$

Общая скорость смеси

$$v_m = v_{SL} + v_{sg} \quad (3.12)$$

Градиент давления по трению равен

$$\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}} = \frac{f \cdot \rho_L \cdot v_{SL} \cdot v_m}{2 \cdot d} \quad (4.39)$$

2. Пробковый режим

Расчитывается так же, как и для Пузырькового режима

3. Переходный режим

Для градиента давления Переходного режима используем линейную интерполяцию для переходных потоков.

Считаем градиент давления на трение для Пробкового режима $\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}}^{\text{Проб}}$.

Задаем плотность газа как

$$\rho'_g = \frac{\rho_g \cdot N_{gv}}{75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}} \quad (4.57)$$

и считаем градиент давления на трение для Эмульсионного режима $\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}}^{\text{Эмульс}}$.

$$A = \frac{(75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}) - N_{gv}}{(75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}) - (50 + 36 \cdot N_{Lv})} \quad (4.56)$$

Получаем итоговое значение градиента на трение

$$\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}} = A \cdot \left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}}^{\text{Проб}} + (1 - A) \cdot \left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}}^{\text{Эмульс}} \quad (4.55)$$

4. Эмульсионный режим

Определяем число Рейнольдса для газовой фазы

$$N_{Reg} = \frac{\rho_g \cdot v_{Sg} \cdot d}{\mu_g} \quad (4.46)$$

Число Вебера

$$N_{We} = \frac{\rho_g \cdot v_{Sg}^2 \cdot \varepsilon}{\sigma_L} \quad (4.47)$$

Безразмерный показатель

$$N_\mu = \frac{\mu_L^2}{\rho_L \cdot \sigma_L \cdot \varepsilon} \quad (4.48)$$

Тогда ε/d считаем в зависимости от $N_{We}N_\mu$

$$N_{We}N_\mu \leq 0.005 \rightarrow \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.0749 \cdot \sigma_L}{\rho_g \cdot v_{Sg}^2 \cdot d} \quad (4.49)$$

$$N_{We}N_\mu > 0.005 \rightarrow \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.3713 \cdot \sigma_L}{\rho_g \cdot v_{Sg}^2 \cdot d} \cdot (N_{We}N_\mu)^{0.302} \quad (4.50)$$

В зависимости от ε/d считаем коэффициент трения f

$$\frac{\varepsilon}{d} \leq 0.05 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left(\frac{2\varepsilon}{3.7d} - \frac{5.02}{N_{Reg}} \cdot \lg \left(\frac{2\varepsilon}{3.7d} + \frac{13}{N_{Reg}} \right) \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{\varepsilon}{d} > 0.05 \rightarrow f = 4 \left(\frac{1}{(4 \lg (0.27 \frac{\varepsilon}{d}))^2} + 0.067 \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{1.73} \right) \quad (4.51)$$

Градиент давления по трению равен

$$\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}} = \frac{f \cdot \rho_g \cdot v_{Sg}^2}{2 \cdot d} \quad (4.45)$$

В рассматриваемом примере Пузырьковый режим. Число Рейнольдса

$$N_{ReL} = \frac{\rho_L \cdot v_{SL} \cdot d}{\mu_L} = \frac{762.64 \text{ кг/м}^3 \cdot 1.21 \text{ м/с} \cdot 0.1524 \text{ м}}{0.97 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}} = 1.45 \cdot 10^5 \text{ б/р}$$

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{18.288 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{0.1524 \text{ м}} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ б/р}$$

по ним определяем поправочный коэффициент трения f_1

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{f_1}} &= -2 \lg \left(\frac{2\varepsilon}{3.7d} - \frac{5.02}{N_{ReL}} \cdot \lg \left(\frac{2\varepsilon}{3.7d} + \frac{13}{N_{ReL}} \right) \right) = \\ &= -2 \lg \left(\frac{2 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4}}{3.7} - \frac{5.02}{1.44 \cdot 10^5} \cdot \lg \left(\frac{2 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4}}{3.7} + \frac{13}{1.44 \cdot 10^5} \right) \right) = 0.0182 \end{aligned}$$

Считаем

$$\frac{f_1 \cdot v_{Sg} \cdot N_d^{2/3}}{4 \cdot v_{SL}} = \frac{0.0182 \cdot 1.176 \text{ м/с} \cdot 143.8^{2/3}}{4 \cdot 1.21 \text{ м/с}} = 1.2 \cdot 10^{-1}$$

и по рисунку 4.8 определяем $f_2 = 1$ – зависимость от f_1 Третий поправочный коэффициент

$$f_3 = 1 + \frac{f_1}{4} \sqrt{\frac{v_{Sg}}{50 \cdot v_{SL}}} = 1 + \frac{0.0182}{4} \sqrt{\frac{1.176 \text{ м/с}}{50 \cdot 1.21 \text{ м/с}}} = 1.0006$$

Получаем значение коэффициента трения

$$f = f_1 \frac{f_2}{f_3} = 0.0182 \cdot \frac{1}{1.0006} = 0.0182$$

Градиент давления по трению равен

$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{трения}} &= \frac{f \cdot \rho_L \cdot v_{SL} \cdot v_m}{2 \cdot d} = \\ &= \frac{0.0182 \cdot 762.64 \text{ кг/м}^3 \cdot 1.21 \text{ м/с} \cdot 2.386 \text{ м/с}}{2 \cdot 0.1524 \text{ м}} = 131.44 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}^2 \end{aligned}$$

3 Градиент давления на гравитацию

При восходящем потоке в вертикальной скважине уравнение градиента давления имеет вид

$$\left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{общ}} = \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{трения}} + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{гравит}} + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{уск}} \quad (3.27)$$

Градиент давления по трению вычислили выше.

Составляющей градиента давления по ускорению, как правило, можно пренебречь, ее учитывают лишь при высоких скоростях течения.

Теперь рассчитаем гравитационную составляющую градиента давления. Падение давления в восходящем потоке в основном определяется именно этой составляющей, за исключением случаев, когда скорость потока является очень высокой.

Значение безразмерного показателя скорости проскальзывания S определяется в зависимости режима потока

1. Пузырьковый режим

По рисунку 4.7 определяем F_1, F_2, F_3, F_4 – зависимости от N_L

Графики функций F_3 и F_4 также изображены на рис. 4.7.

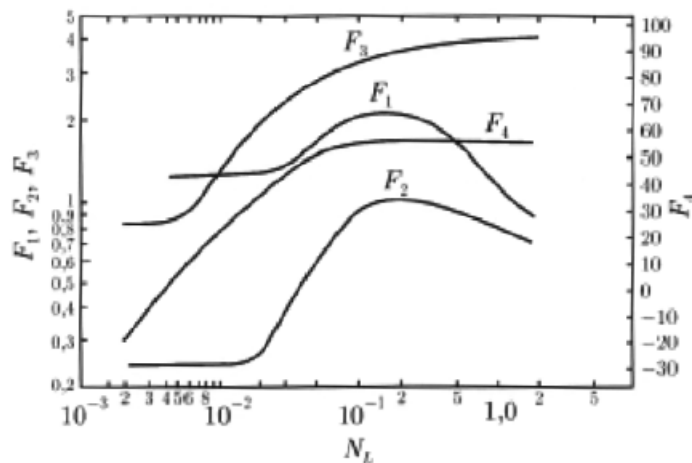


Рис. 4.7. Параметры, характеризующие скорость проскальзывания для пузырькового режима потока по методу Данса и Роса

$$F'_3 = F_3 - \frac{F_4}{N_d} \quad (4.38)$$

тогда

$$S = F_1 + F_2 \cdot N_{Lv} + F'_3 \left(\frac{N_{gv}}{1 + N_{Lv}} \right)^2 \quad (4.37)$$

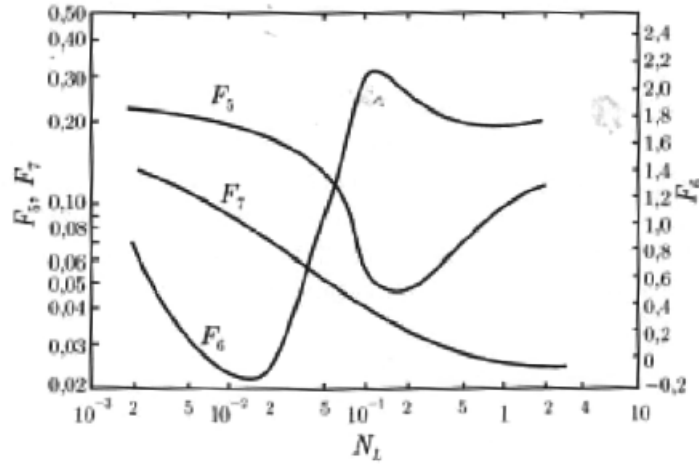


Рис. 4.9. Параметры, определяющие скорость проскальзывания для пробкового режима потока по методу Данса и Роса

2. Пробковый режим

По рисунку 4.9 определяем F_5 , F_6 , F_7 – зависимости от N_L

$$F'_6 = 0.029 \cdot N_d + F_6 \quad (4.44)$$

тогда

$$S = (1 + F_5) \cdot \frac{(N_{gv})^{0.982} + F'_6}{1 + F_7 \cdot N_{Lv}} \quad (4.43)$$

3. Переходный режим

Для градиента давления Переходного режима используем линейную интерполяцию для переходных потоков.

Считаем градиент давления на гравитацию для Пробкового режима $\left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{трения}}^{\text{Проб}}$.

Задаем плотность газа как

$$\rho'_g = \frac{\rho_g \cdot N_{gv}}{75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}} \quad (4.57)$$

и считаем градиент давления на гравитацию для Эмульсионного режима $\left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{трения}}^{\text{Эмульс}}$.

$$A = \frac{(75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}) - N_{gv}}{(75 + 84 \cdot N_{Lv}^{0.75}) - (50 + 36 \cdot N_{Lv})} \quad (4.56)$$

Получаем итоговое значение градиента на гравитацию

$$\left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{грав}} = 1 - A \cdot \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{грав}}^{\text{Проб}} + (1 - A) \cdot \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{грав}}^{\text{Эмульс}} \quad (4.55)$$

4. Эмульсионный режим

При данном режиме эффект проскальзывания почти отсутствует, поэтому $S = 0 \rightarrow v_s = 0 \rightarrow H_L = \lambda_L$, где

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_g} = \frac{q_o + q_w}{q_o + q_w + q_g} \quad (3.8)$$

Скорость проскальзывания v_s получим через найденный безразмерный показатель скорости проскальзывания S в зависимости от режима потока

$$S = v_s \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}} \rightarrow v_s = \frac{S}{\sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}}} \quad (4.33)$$

Общая скорость смеси

$$v_m = v_{SL} + v_{Sg} \quad (3.12)$$

Объемное содержание жидкости

$$H_L = \frac{v_s - v_m + \sqrt{(v_m - v_s)^2 + 4 \cdot v_s \cdot v_{SL}}}{2 \cdot v_s} \quad (4.36)$$

Плотность смеси с учетом эффекта проскальзывания:

$$\rho_s = \rho_L \cdot H_L + \rho_g (1 - H_L) \quad (3.22)$$

Градиент давления по гравитации:

$$\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{гравит}} = \rho_s \cdot g$$

В рассматриваемом примере Пузырьковый режим. По рисунку 4.7 при $N_L = 0.0118$ получаем $F_1 = 1.28$, $F_2 = 0.25$, $F_3 = 1.43$, $F_4 = 25.7$:

$$F'_3 = F_3 - \frac{F_4}{N_d} = 1.43 - \frac{25.7}{146.8} = 1.258$$

тогда

$$S = F_1 + F_2 \cdot N_{Lv} + F'_3 \left(\frac{N_{gv}}{1 + N_{Lv}} \right)^2$$

$$= 1.28 + 0.25 \cdot 11.87 + 1.258 \left(\frac{11.54}{1 + 11.87} \right)^2 = 5.259$$

$$v_s = \frac{S}{\sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}}} = \frac{5.259}{\sqrt[4]{\frac{762.64 \text{ кг/м}^3}{9.81 \text{ м/с}^2 \cdot 8.41 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}^2}}} = 0.536 \text{ м/с}$$

Общая скорость смеси

$$v_m = v_{SL} + v_{Sg} = 1.21 \text{ м/с} + 1.176 \text{ м/с} = 2.386 \text{ м/с}$$

Объемное содержание жидкости

$$H_L = \frac{v_s - v_m + \sqrt{(v_m - v_s)^2 + 4 \cdot v_s \cdot v_{SL}}}{2 \cdot v_s}$$

$$= \frac{0.536 \text{ м/с} - 2.386 \text{ м/с} + \sqrt{(2.386 \text{ м/с} - 0.536 \text{ м/с})^2 + 4 \cdot 0.536 \text{ м/с} \cdot 1.21 \text{ м/с}}}{2 \cdot 0.536 \text{ м/с}}$$

$$= 0.562 \text{ б/р}$$

Плотность смеси с учетом эффекта проскальзывания:

$$\rho_s = \rho_L \cdot H_L + \rho_g (1 - H_L) =$$

$$762.64 \text{ кг/м}^3 \cdot 0.562 + 94.16 \text{ кг/м}^3 (1 - 0.562) = 469.85 \text{ кг/м}^3$$

Градиент давления по гравитации:

$$\left(\frac{dp}{dZ} \right)_{\text{гравит}} = \rho_s \cdot g = 4609.33 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{с)}^2$$

4 Общий градиент давления

Общий градиент давления это сумма градиентов давления на трение и на гравитацию, вычисленные ранее. Градиентом давления на ускорение прене-

брегаем

$$\left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{общ}} = \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{трения}} + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{гравит}} + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{уск}} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{общ}} &= \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{трения}} + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{\text{гравит}} = \\ &= 131.44 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})^2 + 4609.32 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})^2 = 4740.68 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})^2 \\ &= 4740.68 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})^2 \cdot 10^{-7} \text{ бар}/\text{м} = 0.047 \text{ бар}/\text{м} \end{aligned}$$

5 Значение давления в трубе (интегрирование градиента)

При расчете падения давления необходимо проинтегрировать градиент давления по длине скважины. Так, общее падение давления будет равно

$$\Delta p = \int_0^L \left(\frac{dp}{dL}\right) dL = \sum_{i=1}^n \left(\frac{dp}{dL}\right)_i \Delta L_i \quad (3.28)$$

В нашем примере $L = 2000$ м и свойства постоянны по всей скважине, значит

$$\Delta p = \int_0^L \left(\frac{dp}{dL}\right) dL = \sum_{i=1}^n \left(\frac{dp}{dL}\right)_i \Delta L_i = 0.047 \text{ бар}/\text{м} \cdot 2000 \text{ м} = 94 \text{ бар}$$

перепад давления по длине скважины 2 000 м составляет 94 бар.