

Приложение НОМЕРПРИЛОЖЕНИЯ

Модель расчета градиента давления Xiao

Расслоенный режим потока.

1. Исходные данные: $Q_{\text{ж}}, Q_{\text{г}}, D, v_{\text{ж}}, v_{\text{г}}, \rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{г}}, \alpha, T, P$,
2. Определяется значение межфазного натяжения σ , Н/м:

$$API = \frac{141,5}{0,001 \cdot \rho_{\text{ж}}} - 131,5 \quad (1)$$

$$p = \frac{P}{6894,757} \quad (2)$$

$$t = 1,8 \cdot (T - 273) + 32 \quad (3)$$

$$\sigma = 10^{-3} \cdot (37,7 - 0,05 \cdot (t - 100) - 0,26 \cdot API) \times \\ \times (1 - 7,1 \cdot 10^{-4} \cdot p + 2,1 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 2,37 \cdot 10^{-11} \cdot p^3) \quad (4)$$

3. Определяется площадь поперечного сечения трубопровода A , м²:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

4. Задаемся шагом изменения величины отношения уровня жидкости в трубе к диаметру h_L/D , $\Delta h_L/D$. Изменение h_L/D описывается следующей зависимостью:

$$\left(\frac{h_L}{D}\right)_{\text{след}} = \frac{h_L}{D} + \frac{\Delta h_L}{D} \quad (6)$$

5. Определяется величина центрального угла θ , рад:

$$\theta = 2 \cdot \arccos\left(1 - 2 \cdot \frac{h_L}{D}\right) \quad (7)$$

6. Определяется площадь поперечного сечения трубопровода занятая жидкой и газовой фазами A_L, A_G , м³:

$$A_L = 0,5 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot (\theta - \sin(\theta)) \quad (8)$$

$$A_G = A - A_L \quad (9)$$

7. Определяется смоченный периметр для жидкой и газовой фаз, S_L и S_G , м, и длина контакта фаз S_i , м:

$$S_L = 0,5 \cdot \theta \cdot D \quad (10)$$

$$S_G = \pi \cdot D - S_L \quad (11)$$

$$S_i = D \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (12)$$

8. Определяются гидравлические диаметры D_L и D_G , м:

$$D_L = 4 \cdot \frac{A_L}{S_L} \quad (13)$$

$$D_G = 4 \cdot \frac{A_G}{S_G + S_i} \quad (14)$$

9. Определяются скорость течения каждой из фаз v_L и v_G , м/с:

$$v_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (15)$$

$$v_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (16)$$

10. Определяются числа Рейнольдса для каждой из фаз:

$$Re_L = \frac{\rho_L \cdot v_L \cdot D_L}{\mu_L} \quad (17)$$

$$Re_G = \frac{\rho_G \cdot v_G \cdot D_G}{\mu_G} \quad (18)$$

11. Определяются коэффициенты трения для жидкой и газовой фаз F_L , F_G , соответственно.

При $Re \leq 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам:

$$F_L = \frac{16}{Re_G} \quad (19)$$

$$F_G = \frac{16}{Re_G} \quad (20)$$

При $Re > 2000$ коэффициенты трения определяются по следующей формуле при помощи итерационного расчета:

$$\frac{1}{\sqrt{F_{L,G}}} = 3,48 - 4 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\epsilon}{D} + \frac{9,35}{Re_{L,G} \cdot \sqrt{F_{L,G}}} \right) \quad (21)$$

12. Определяется критическая скорость газа $v_{sg,t}$, м/с, при которой режим течения меняется с расслоенного гладкого на расслоенный волнистый:

$$v_{sg,t} = 5 \cdot \sqrt{\frac{101325}{P}} \quad (22)$$

13. Определяется приведенная скорость газа v_{sg} , м/с:

$$v_{sg} = \frac{Q_G}{A} \quad (23)$$

14. При диаметре $D \leq 0.127$ м коэффициент трения F_i для зоны контакта фаз определяется как:

$$F_i = F_G, \quad \text{при } v_{sg} \leq v_{sg,t} \quad (24)$$

$$F_i = F_G \left(1 + 15 \cdot \sqrt{\frac{h_L}{D}} \cdot \left(\frac{v_{sg}}{v_{sg,t}} - 1 \right) \right), \quad \text{при } v_{sg} > v_{sg,t} \quad (25)$$

15. При диаметре $D > 0.127$ м коэффициент трения для зоны контакта фаз ϵ определяется как:

$$\epsilon_i = \begin{cases} 34 \cdot \frac{\sigma}{\rho_G \cdot v_L^2}, & \text{при } N_{we} N_\mu \leq 0,005 \\ 170 \cdot \frac{\sigma \cdot (N_{we} \cdot N_\mu)^{0.3}}{\rho_G \cdot v_L^2}, & \text{при } N_{we} N_\mu > 0,005 \end{cases} \quad (26)$$

где $N_{we}N_\mu$:

$$N_{we}N_\mu = \frac{\rho_G \cdot v_L^2 \cdot \mu_L^2}{\sigma^2 \cdot \rho_L} \quad (27)$$

16. Определяется коэффициент трения для зоны контакта фаз:

$$\frac{1}{\sqrt{F_i}} = 3,48 - 4 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\epsilon_i}{D} + \frac{9,35}{Re_G \cdot \sqrt{F_i}} \right) \quad (28)$$

17. Определяются касательные напряжения τ , Па:

$$\tau_{wL} = F_{wL} \cdot \frac{\rho_L \cdot v_L^2}{2} \quad (29)$$

$$\tau_{wG} = F_{wG} \cdot \frac{\rho_G \cdot v_G^2}{2} \quad (30)$$

$$\tau_i = F_i \cdot \frac{\rho_G \cdot v_G^2}{2} \quad (31)$$

18. Проверяется условие:

$$\tau_{wL} \cdot \frac{S_L}{A_L} - \tau_{wG} \cdot \left[\left(\frac{S_G}{A_G} \right) + \left(\frac{\tau_i}{\tau_{wG}} \right) \cdot \left(\frac{S_i}{A_L} + \frac{S_i}{A_G} \right) \right] + (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 0 \quad (32)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

При невыполнении данного условия расчет повторяют начиная с 4 шага, увеличивая значение h_L/D на шаг.

19. Степень заполнения трубопровода жидкостью E_L определяется из выражения:

$$E_L = \frac{\theta - \sin(\theta)}{2 \cdot \pi} \quad (33)$$

20. Определяется перепад давления dP/dx , Па/м:

$$-\left(\frac{dP}{dx}\right) = \frac{\tau_{wL} \cdot S_L + \tau_{wG} \cdot S_G}{A} + \left(\frac{A_L}{A} \cdot \rho_L + \frac{A_G}{A} \cdot \rho_G \right) \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (34)$$

Прерывистый режим потока.

1. Исходные данные: $Q_{ж}$, $Q_{г}$, $D_{вн}$, $v_{ж}$, $v_{г}$, $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$, α , T , P .
2. Определяется значение межфазного натяжения σ :

$$API = \frac{141,5}{0,001 \cdot \rho_{ж}} - 131,5 \quad (35)$$

$$p = \frac{P}{6894,757} \quad (36)$$

$$t = 1,8 \cdot (T - 273) + 32 \quad (37)$$

$$\sigma = 10^{-3} \cdot (37,7 - 0,05 \cdot (t - 100) - 0,26 \cdot API) \times \\ \times (1 - 7,1 \cdot 10^{-4} \cdot p + 2,1 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 2,37 \cdot 10^{-11} \cdot p^3) \quad (38)$$

3. Определяется площадь поперечного сечения трубопровода:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (39)$$

4. Определяется скорость течения пробки v_s :

$$v_s = v_{sL} + v_{sG} \quad (40)$$

где v_{sL} – приведенная скорость жидкости, м/с;

$$v_{sL} = \frac{Q_L}{A}; v_{sG} = \frac{Q_G}{A} \quad (41)$$

5. Определяется степень заполнения жидкостью трубы в зоне пробки E_s :

$$E_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_s}{8,66}\right)^{1,39}} \quad (42)$$

6. Определяется скорость диспергированных пузырьков v_b , м/с:

$$v_b = 1,2 \cdot v_s + 1,53 \cdot \left[\frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} \cdot E_s^{0,1} \cdot \sin(\alpha) \quad (43)$$

7. Определяется скорость жидкости в зоне пробки v_L , м/с:

$$v_L = \frac{v_s - v_b(1 - E_s)}{E_s} \quad (44)$$

8. Определяются плотность и вязкость пробки ρ_s , кг/м³, и μ_s , Па·с, соответственно:

$$\rho_s = E_s \cdot \rho_L + (1 - E_s) \cdot \rho_G \quad (45)$$

$$\mu_s = E_s \cdot \mu_L + (1 - E_s) \cdot \mu_g \quad (46)$$

9. Определяется число Рейнольдса для пробки:

$$Re_s = \frac{\rho_s \cdot v_s \cdot D}{\mu_s} \quad (47)$$

10. Определяются коэффициент трения для пробковой зоны:

При $Re_s \leq 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам:

$$F_s = \frac{16}{Re_s} \quad (48)$$

При $Re_s > 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам при помощи итерационного расчета:

$$\frac{1}{\sqrt{F_s}} = 3,48 - 4 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\epsilon}{D} + \frac{9,35}{Re_s \cdot \sqrt{F_s}} \right). \quad (49)$$

11. Определяется скорость v_t , м/с:

$$v_t = C \cdot v_s + 0,35 \cdot \sqrt{gD} \cdot \sin(\alpha) + 0,54 \cdot \sqrt{gD} \cdot \cos(\alpha). \quad (50)$$

12. Задаем шаг изменения степени заполнения трубы жидкостью в пленочной зоне:

$$(E_f)_{\text{след}} = E_f + \Delta E_f \quad (51)$$

13. Определяется площадь поперечного сечения трубопровода занятая жидкой и газовой фазами A_f и A_G , соответственно, м²:

$$A_f = A \cdot E_f \quad (52)$$

$$A_G = A - A_L \quad (53)$$

14. Определяется отношение h_L/D методом итерации:

$$E_f = \frac{\theta - \sin(\theta)}{2 \cdot \pi}, \quad \text{где } \theta = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{2h_L}{D}\right) \quad (54)$$

15. Определяется смоченный периметр для жидкой и газовой фаз и длина контакта фаз:

$$S_f = 0.5 \cdot \theta \cdot D \quad (55)$$

$$S_G = \pi \cdot D - S_L \quad (56)$$

$$S_i = D \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (57)$$

16. Определяются гидравлические диаметры:

$$D_f = 4 \cdot \frac{A_f}{S_f} \quad (58)$$

$$D_G = 4 \cdot \frac{A_G}{S_G + S_I} \quad (59)$$

17. Определяются скорость течения каждой из фаз:

$$v_f = v_t - \frac{(v_t - v_L) \cdot E_s}{E_f} \quad (60)$$

$$v_G = \frac{v_s - v_f \cdot E_f}{1 - E_f} \quad (61)$$

18. Определяются числа Рейнольдса для каждой из фаз:

$$Re_f = \frac{\rho_L \cdot v_f \cdot D_L}{\mu_L} \quad (62)$$

$$Re_G = \frac{\rho_G \cdot v_G \cdot D_G}{\mu_G} \quad (63)$$

19. Определяются коэффициенты трения для жидкой и газовой фаз.

При $Re \leq 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам:

$$F_L = \frac{16}{Re_G} \quad (64)$$

$$F_G = \frac{16}{Re_G} \quad (65)$$

При $Re > 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам при помощи итерационного расчета:

$$\frac{1}{\sqrt{F_{L,G}}} = 3,48 - 4 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\epsilon}{D} + \frac{9.35}{Re_{L,G} \cdot \sqrt{F_{L,G}}} \right) \quad (66)$$

20. Определяются касательные напряжения для жидкой и газовой фаз и зоны контакта фаз:

$$\tau_f = F_f \cdot \frac{\rho_L \cdot |v_f| \cdot v_f}{2} \quad (67)$$

$$\tau_g = F_G \cdot \frac{\rho_G \cdot |v_G| \cdot v_G}{2} \quad (68)$$

$$\tau_i = F_i \cdot \frac{\rho_G \cdot |v_G - v_f| \cdot (v_G - v_f)}{2} \quad (69)$$

21. Проверяется условие:

$$\tau_f \cdot \frac{S_f}{A_f} - \tau_G \cdot \left[\left(\frac{S_G}{A_G} \right) + \left(\frac{\tau_i}{\tau_G} \right) \cdot \left(\frac{S_i}{A_f} + \frac{S_i}{A_G} \right) \right] + (\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 0 \quad (70)$$

При невыполнении данного условия расчет повторяют, начиная с пункта 12.

22. Определяется длина пробки L_s , м:

$$L_s = \exp(-26,6 + 28,5 \cdot (\ln(D) + 3,67)^{0,1}) \quad (71)$$

23. Определяется длина всей зоны, на которой существует прерывистый режим течения, L_u , м:

$$L_u = L_s \cdot \frac{v_L \cdot E_s - v_f \cdot E_f}{v_{sL} - v_f \cdot E_f} \quad (72)$$

24. Определяется средняя плотность среды:

$$\rho_u = E_L \cdot \rho_L + (1 - E_L) \cdot \rho_G \quad (73)$$

25. Определяется перепад давления dP/dx , Па/м:

$$-\left(\frac{dP}{dx}\right) = \rho_u \cdot g \cdot \sin(\alpha) + \frac{1}{L_u} \cdot \left[\left(\frac{\tau_s \cdot \pi \cdot D}{A} \cdot L_s \right) + \frac{\tau_f \cdot S_f + \tau_G \cdot S_G}{A} \cdot L_f \right] \quad (74)$$

Кольцевой режим течения.

1. Исходные данные: $Q_{ж}$, $Q_{г}$, $D_{вн}$, $v_{ж}$, $v_{г}$, $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$, α , T , P .
2. Определяется значение межфазного натяжения σ :

$$API = \frac{141,5}{0,001 \cdot \rho_{ж}} - 131,5 \quad (75)$$

$$p = \frac{P}{6894,757} \quad (76)$$

$$t = 1,8 \cdot (T - 273) + 32 \quad (77)$$

$$\sigma = 10^{-3} \cdot (37,7 - 0,05 \cdot (t - 100) - 0,26 \cdot API) \times \\ \times (1 - 7,1 \cdot 10^{-4} \cdot p + 2,1 \cdot 10^{-7} \cdot p^2 + 2,37 \cdot 10^{-11} \cdot p^3) \quad (78)$$

3. Определяется площадь поперечного сечения трубопровода:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (79)$$

4. Задаемся шагом изменения величины отношения толщины кольцевого слоя жидкости к диаметру $\Delta(\delta/D)$. Изменение δ/D описывается следующей зависимостью:

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_{\text{след}} = \frac{\delta}{D} + \Delta \frac{\delta}{D} \quad (80)$$

5. Находится величина параметра FE по формуле:

$$\frac{FE}{1 - FE} = 10^{\beta_0} \cdot \rho_L^{\beta_1} \cdot \rho_G^{\beta_2} \cdot \mu_L^{\beta_3} \cdot \mu_G^{\beta_4} \cdot \sigma^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6} \cdot v_{SL}^{\beta_7} \cdot v_{SG}^{\beta_8} \cdot g^{\beta_9} \quad (81)$$

где

$$v_{SL} = \frac{Q_L}{A}; v_{SG} = \frac{Q_G}{A} \quad (82)$$

Коэффициенты β определяются из таблицы, представленной ниже.

Таблица 1 – Определение коэффициентов β .

Параметр	Стандартное значение	Зависимость параметра β от числа Рейнольдса					
		100-300	300-10 ³	10 ³ -3·10 ³	3·10 ³ -10 ⁴	10 ⁴ -3·10 ⁴	3·10 ⁴ -10 ⁵
β_0	-2,52	-0,69	-1,73	-3,31	-8,27	-6,38	-0,12
β_1	1,08	0,63	0,94	1,15	0,77	0,89	0,45
β_2	0,18	0,96	0,62	0,40	0,71	0,70	0,25
β_3	0,27	-0,80	-0,63	-1,02	-0,13	-0,17	0,86
β_4	0,28	0,09	0,50	0,46	-1,18	-0,55	-0,05
β_5	-1,80	-0,88	-1,42	-1,00	-0,17	-0,87	-1,51
β_6	1,72	2,45	2,04	1,97	1,16	1,67	0,91
β_7	0,70	0,91	1,05	0,95	0,83	1,04	1,08
β_8	1,44	-0,16	0,96	0,78	1,45	1,27	0,71
β_9	0,46	0,86	0,48	0,41	-0,32	0,07	0,21

6. Значения скоростей для жидкой и газовой фаз при кольцевом режиме течения определяют как:

$$v_f = \frac{v_{SL} \cdot (1 - FE)}{4 \cdot \frac{\delta}{D} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{D}\right)} \quad (83)$$

$$v_c = \frac{v_{SG} + v_{SL} \cdot FE}{\left(1 - 2 \cdot \frac{\delta}{D}\right)^2} \quad (84)$$

7. Определяются площади поперечного сечения трубы, занятые фазами:

$$A_f = A - 0,25 \cdot \pi \cdot \left(D - 2 \cdot \left(\frac{\delta}{D} \right) \cdot D \right)^2 \quad (85)$$

$$A_c = A - A_L. \quad (86)$$

8. Определяются значения смоченного периметра и периметра границы раздела фаз:

$$S_L = \pi \cdot D; \quad (87)$$

$$S_i = \pi \cdot \left(D - 2 \cdot \left(\frac{\delta}{D} \right) \cdot D \right). \quad (88)$$

9. Вязкость газового ядра и его диаметр определяют по формулам:

$$\mu_c = E_c \cdot \mu_L + (1 - E_c) \cdot \mu_G; \quad (89)$$

$$D_c = D - 2\delta. \quad (90)$$

10. Определяют числа Рейнольдса для жидкой фазы и газового ядра:

$$Re_L = \frac{\rho_L \cdot v_f \cdot D_L}{\mu_L} \quad (91)$$

$$Re_c = \frac{\rho_c \cdot v_c \cdot D_c}{\mu_c} \quad (92)$$

11. Определяются коэффициенты трения для жидкой и газовой фаз.

При $Re \leq 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам:

$$F_f = \frac{16}{Re_f} \quad (93)$$

$$F_c = \frac{16}{Re_c} \quad (94)$$

При $Re > 2000$ коэффициенты трения определяются по следующим формулам при помощи итерационного расчета:

$$\frac{1}{\sqrt{F_{f,c}}} = 3,48 - 4 \cdot \log_{10} \left(\frac{2\epsilon}{D} + \frac{9,35}{Re_{f,c} \cdot \sqrt{F_{f,c}}} \right) \quad (95)$$

12. Определяется степень заполнения трубопровода жидкостью в газовом ядре:

$$E_c = \frac{v_{sL} \cdot FE}{v_{sG} + v_{sL} \cdot FE} \quad (96)$$

13. Плотность газового ядра находится из выражения:

$$\rho_c = E_c \cdot \rho_L + (1 - E_c) \cdot \rho_G \quad (97)$$

14. Касательные напряжения определяются из выражений:

$$\tau_{wL} = F_f \cdot \frac{\rho_L \cdot v_f^2}{2} \quad (98)$$

$$\tau_i = F_i \cdot \frac{\rho_c \cdot (v_c - v_f)^2}{2} \quad (99)$$

где

$$F_i = F_c \cdot \left[1 + 2250 \cdot \frac{\left(\frac{\delta}{D} \right)}{\left(\frac{\rho_c \cdot (v_c - v_f)^2 \cdot \delta}{\sigma} \right)} \right] \quad (100)$$

15. Проверяется условие:

$$\tau_{wL} \cdot \frac{S_L}{A_f} - \tau_i \cdot S_i \cdot \left(\frac{1}{A_f} + \frac{1}{A_c} \right) + (\rho_L - \rho_c) \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 0 \quad (101)$$

При невыполнении условия расчет повторяют, начиная с пункта 4.

16. Степень заполнения трубы жидкостью определяется из выражения:

$$E_L = 1 - \left(1 - 2 \cdot \frac{\delta}{D} \right)^2 \cdot \frac{v_{sG}}{v_{sG} + v_{sL} \cdot FE} \quad (102)$$

17. Градиент давления dP/dx , Па/м, определяется из выражения:

$$-\left(\frac{dP}{dx}\right) = \frac{\tau_{wL} \cdot S_L}{A} + \left(\frac{A_f}{A} \cdot \rho_L + \frac{A_c}{A} \cdot \rho_c\right) \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (103)$$

