

МИНИСТЕРСТВО ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ  
(ВНИИГАЗ)

---

Согласовано с Техническим и  
Геологическим Управлениями  
11/VI 1979 г.

Утверждено Министерством  
газовой промышленности  
14/VI 1979 г.

ИНСТРУКЦИЯ  
ПО КОМПЛЕКСНОМУ  
ИССЛЕДОВАНИЮ ГАЗОВЫХ  
И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ  
ПЛАСТОВ  
И СКВАЖИН

Под редакцией  
Г. А. Зотова, З. С. Алиева

ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА



МОСКВА «НЕДРА» 1980

Потери давления на клапане 22МОХ38150 определяются по формуле

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0,6284 \cdot 10^{-3} \frac{\bar{\rho} T_1}{d^4 p_1} Q^2 = k Q^2, \quad (III.38)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $\bar{\rho}$  — относительная плотность газа;  $T_1$  — температура газа под клапаном, К;  $d$  — диаметр штуцера, см;  $p_1$  — давление под клапаном, кгс/см<sup>2</sup>;  $Q$  — дебит, тыс. м<sup>3</sup>/сут.

*Пример.* Определить потери давления на клапане 22МОХ38150 с диаметром штуцера  $d = 2,54$  см при  $Q = 430$  тыс. м<sup>3</sup>/сут;  $p_1 = 100$  кгс/см<sup>2</sup>;  $T_1 = 303$  К;  $\bar{\rho} = 0,6$ .

$$\Delta p = 0,6284 \cdot 10^{-3} \frac{0,6 \cdot 303}{(2,54)^4 \cdot 100} 430^2 = 0,2744 \cdot 10^{-4} \cdot 430^2 = 5 \text{ кгс/см}^2.$$

Из приведенного примера видно, что при аналогичных условиях коэффициент пропорциональности  $c_{\text{РКА}}$  клапана «РКА-03», определяемый по рис. III.8, при  $p_1 = 100$  кгс/см<sup>2</sup> и  $d = 25,4$  мм полностью совпадает с коэффициентом пропорциональности  $k$  в формуле (III.38).

Сопоставим потери на клапане 22МОХ38150 при  $d = 3,334$  см;  $p_1 = 100$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\bar{\rho} = 0,6$ ;  $T_1 = 290$  К и  $Q = 906$  тыс. м<sup>3</sup>/сут с потерями, получаемыми на клапане «РКД» при аналогичных данных. Согласно (III.38) потери на клапане 22МОХ38150 будут:

$$\Delta p = 0,6284 \cdot 10^{-3} \frac{0,6 \cdot 293}{(3,334)^4 \cdot 100} 906^2 = 0,894 \cdot 10^{-5} \cdot 906^2 = 7,3 \text{ кгс/см}^2,$$

что показывает практическую однозначность потерь давления во всех клапанах.

### III.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СТВОЛУ СКВАЖИНЫ

Для различных расчетов, связанных с подсчетом запасов газа и проектированием разработки газовых и газоконденсатных месторождений, необходимо знать распределение температуры газа по стволу скважины. Изменение температуры в остановленной и работающей скважине помимо непосредственных замеров можно определить аналитическим путем.

#### III.6.1. Распределение температуры в остановленной скважине

Распределение температуры в остановленной скважине следует определять после длительной консервации жидкостью. Как правило, распределение температуры в простаивающей скважине определяется непосредственным замером.

Для практических расчетов изменение температуры с глубиной можно определить по формуле

$$t_x = t_{\text{пл}} - \Gamma(L - x), \quad (III.39)$$

где  $t_x$  — температура на глубине  $x$ , °С;  $t_{\text{пл}}$  — температура пласта с глубиной залегания  $L$ , °С;  $\Gamma$  — средний геотермический градиент, град/м, определяемый по формуле

$$\Gamma = (t_{\text{пл}} - t_{\text{н.с}})/(L - h_{\text{н.с}}). \quad (III.40)$$

Здесь  $t_{\text{н.с}}$  — температура нейтрального слоя, °С;  $h_{\text{н.с}}$  — глубина нейтрального слоя, м.

При наличии зоны многолетней мерзлоты геотермический градиент определяется по формуле

$$\Gamma = (t_{\text{пл}} - t_{\text{м}})/(L - h_{\text{м}}), \quad (III.41)$$

где  $t_{\text{м}}$  — температура мерзлого грунта, °С;  $h_{\text{м}}$  — глубина нижней границы мерзлоты, м.

Формула (III.41) используется для определения геотермического градиента только до нижней границы зоны многолетней мерзлоты.

В зоне многолетней мерзлоты геотермический градиент можно оценить по формуле

$$\Gamma_{\text{м}} = (t_{\text{м}} - t_{\text{н.с}})/(h_{\text{м}} - h_{\text{н.с}}). \quad (III.42)$$

#### III.6.2. Изменение температуры в призабойной зоне работающей скважины

Перепад температуры в пласте при работе скважины определяется по формуле

$$\Delta t = t_{\text{пл}} - t_3 = D_i (p_{\text{пл}} - p_3) \frac{\lg \left[ 1 + \frac{GC_p \tau}{\pi H C_{\text{п}} R_c^2} \right]}{\lg \frac{R_{\text{к}}}{R_c}}, \quad (III.43)$$

где  $t_{\text{пл}}$ ,  $t_3$  — соответственно пластовая и забойная температура, °С;  $D_i$  — коэффициент Джоуля—Томсона в пласте, °С/(кгс/см<sup>2</sup>);  $R_{\text{к}}$ ,  $R_c$  — радиусы контура и скважины соответственно, м;  $p_{\text{пл}}$ ,  $p_3$  — соответственно пластовое и забойное давление, кгс/см<sup>2</sup>;  $H$  — перфорированная мощность пласта, м;  $G$  — массовый расход газа, кг/ч; при известном объемном расходе определяется по формуле

$$G = 54 \bar{\rho} Q; \quad (III.44)$$

$\bar{\rho}$  — относительная плотность газа;  $Q$  — объемный расход газа, тыс. м<sup>3</sup>/сут (при 0°С);  $C_p$  — теплоемкость газа в пластовых условиях, ккал/кг·°С; определяется согласно п. II.7;  $\tau$  — время работы скважины с начала эксплуатации, ч;  $C_{\text{п}}$  — объемная теплоемкость горных пород, ккал/м<sup>3</sup>·°С.

Теплоемкость горных пород  $C_{\text{п}}$  в целом изменяется незначительно и для сухих пород колеблется от 0,18 до 0,20 ккал/кг·°С. Насыщение влагой приводит к увеличению теплоемкости пород. Для практических расчетов с учетом насыщения пород влагой  $C_{\text{п}}$  принимается равной 0,3 ккал/кг·°С, или 700 ккал/м<sup>3</sup>·°С.

#### III.6.3. Распределение температуры в стволе работающей скважины при отсутствии зоны многолетней мерзлоты

Температура газа в стволе работающей скважины на глубине  $x$  определяется по формуле

$$t_x = t_{\text{пл}} - \Gamma x - \Delta t e^{-\alpha x} + \frac{1 - e^{-\alpha x}}{\alpha} \left[ \Gamma - \frac{D_i (p_3 - p_x)}{x} - \frac{A}{C_p} \right], \quad (III.45)$$

где  $t_x$  — температура газа на глубине  $x$  при отсчете от середины интервала перфорации, °С;  $\Delta t$  — перепад температуры в пласте, определяемый по формуле (III.43), °С;  $\Gamma$  — средний геотермический градиент на участке от 0 до  $x$ , °С;  $D_i$  — дифференциальный коэффициент Джоуля—Томсона в стволе скважины, °С/(кгс/см<sup>2</sup>), определяемый по графикам, приведенным в п. II.8;  $p_x$  — давление на глубине  $x$  при отсчете от середины интервала перфорации, кгс/см<sup>2</sup>;  $A$  — термический эквивалент работы, 1/427 ккал/кг·м;  $C_p$  — средняя теплоемкость газа при  $p_{\text{ср}} = (p_3 + p_x)/2$ , ккал/кг·°С;  $\alpha$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\alpha = 2\pi\lambda_{\text{п}}/GC_p f(\tau). \quad (III.46)$$

Здесь  $\lambda$  — теплопроводность горных пород, ккал/м·ч·°С;  $f(\tau)$  — безразмерная функция времени

$$f(\tau) = \ln \left( 1 + \sqrt{\frac{\pi\lambda_{\text{п}}\tau}{C_{\text{п}}R_c^2}} \right). \quad (III.47)$$

Теплопроводность горных пород, так же как и теплоемкость, зависит не только от свойств самих пород, но и от насыщенности влагой. Теплопроводность пород определяется по рис. III.9 в зависимости от плотности сухого скелета.

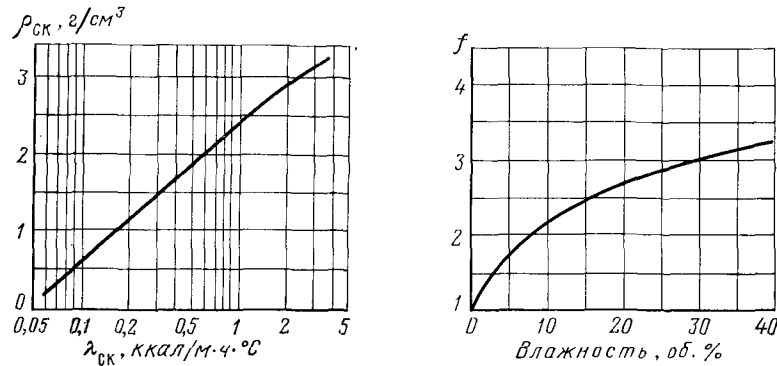


Рис. III.9. Зависимость теплопроводности сухого скелета горных пород от их плотности

Рис. III.10. Поправочный коэффициент для определения теплопроводности влажных горных пород

Влияние влажности на коэффициент теплопроводности учитывается путем умножения  $\lambda_{ск}$  на поправочный коэффициент  $f$ , определяемый по рис. III.10. При определении влияния поправочного коэффициента  $f$  на влажность объемный процент влажности принимается равным пористости породы.

Средневзвешенный коэффициент теплопроводности, определяемый для каждого из интервалов, по разрезу вычисляется по формуле

$$\lambda_{п} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{пi} h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (III.48)$$

где  $\lambda_{пi}$  — теплопроводность отдельных интервалов, отличающихся по литологическому составу;  $h_i$  — мощности отдельных интервалов.

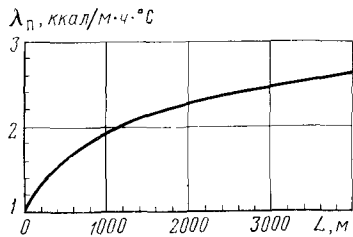


Рис. III.11. Теплопроводность глины в зависимости от глубины залегания

Значения коэффициента  $\lambda_{пi}$  для отдельных пород, часто используемые в расчетах, приведены ниже.

Гранит . . . . .	1,6—1,8	Песок кварцевый . . . . .	0,3
Долomit . . . . .	2,0	Сланец глинистый . . . . .	2,1
Известняк . . . . .	1,6—2,0	Соль каменная . . . . .	5,4—6,0
Лед . . . . .	1,8—2,0	Сталь . . . . .	40—45
Мел . . . . .	0,8	Цементный камень . . . . .	0,8—1,2

Теплопроводность глин в зависимости от глубины залегания показана на рис. III.11.

### III.6.4. Распределение температуры в стволе работающей скважины при наличии в разрезе зоны многолетней мерзлоты

Распределение температуры в стволе работающей скважины при наличии в разрезе зоны многолетней мерзлоты определяется формулой (III.45) в интервале от забоя до начала зоны многолетней мерзлоты.

Температура газа при входе в зону многолетней мерзлоты рассчитывается по формуле

$$t_{0м} = t_{пл} - \Gamma x_{0м} - \Delta t e^{-\alpha x_{0м}} + \frac{1 - e^{-\alpha x_{0м}}}{\alpha} \left[ \Gamma - \frac{D_i (p_z - p_{x_{0м}})}{x_{0м}} - \frac{A}{C_p} \right], \quad (III.49)$$

где  $t_{0м}$  — температура при входе в зону многолетней мерзлоты, °C;  $x_{0м}$  — расстояние от середины интервала перфорации до начала зоны мерзлоты, м;  $\Gamma$  — геотермический градиент, определяемый по формуле (III.41), °C/м; остальные обозначения прежние.

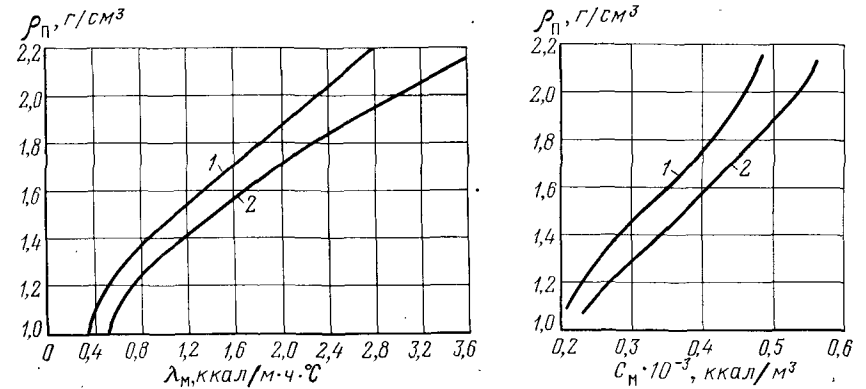


Рис. III.12. Зависимость теплопроводности мерзлых грунтов от плотности. 1 — глина; 2 — песчаник

Рис. III.13. Зависимость теплоемкости мерзлых грунтов от плотности. 1 — глина; 2 — песчаник

В пределах зоны многолетней мерзлоты распределение температуры в стволе скважины описывается формулой

$$t_x = t_{0м} - \Gamma_m x + \frac{1 - e^{-\alpha_m x}}{\alpha_m} \left[ \Gamma_m - \frac{D_i (p_{x_{0м}} - p_x)}{x} - \frac{A}{C_p} \right] \beta, \quad (III.50)$$

где  $t_x$  — температура газа на расстоянии  $x$  при отсчете от начала многолетней мерзлоты снизу вверх, °C;  $\Gamma_m$  — геотермический градиент, определяемый по формуле (III.42);  $x$  — переменная координата от начала зоны мерзлоты, снизу вверх, м;  $p_{x_{0м}}$  — давление при входе в зону мерзлоты, кгс/см²;  $p_x$  — давление на глубине  $x$  при отсчете от начала зоны многолетней мерзлоты снизу вверх, кгс/см².

Коэффициент  $\alpha_m$  определяется из выражения

$$\alpha_m = 2\pi\lambda_m / GC_p f(\tau), \quad (III.51)$$

а функция  $f(\tau)$  — по формуле

$$f(\tau) = \ln \left( 1 + \sqrt{\frac{\pi\lambda_m}{C_m R_c^2}} \right). \quad (III.52)$$

Здесь  $\lambda_m$  — теплопроводность мерзлых грунтов, ккал/м·°C (рис. III.12), а  $C_m$  — их теплоемкость, ккал/м³ (рис. III.13);  $\beta$  — безразмерный коэффициент, учитывающий изменяющуюся скорость теплообмена при наличии отрицательных температур, может приближенно оцениваться в зависимости от температуры мерзлых грунтов по формуле

$$\beta = \frac{1}{t_{с.г}^2} (t_m - t_{с.г})^2,$$

где  $t_m$  — средняя температура мерзлого или талого грунта в зоне многолетней мерзлоты, °С;  $t_{с.г}$  — среднегодовая температура поверхности почвы, °С.

*Пример.* Определить распределение температуры по стволу скважины, работающей с дебитом  $Q = 1200$  тыс. м<sup>3</sup>/сут, при следующих исходных данных:  $t_{пл} = 137$  °С;  $p_{пл} = 261,6$  кгс/см<sup>2</sup>;  $p_3 = 221,4$  кгс/см<sup>2</sup>;  $H = 50$  м;  $R_k = 500$  м;  $R_c = 0,1$  м;  $\bar{\rho} = 0,6$ ;  $\tau = 8700$  ч;  $G = 0,0325$  °С/м. Теплоемкость пород  $C_p$  принимается равной  $700$  ккал/м<sup>3</sup>·°С;  $\lambda_{п} = 2,3$  ккал/м·ч·°С. Масса киломоля газа равна  $17,43$  кг/кмоль.

Расчет проведен для глубин  $L = 400, 1400, 2400, 3400$  м (устье скважины), считая от середины интервала перфорации.

Результаты расчетов приведены в табл. III.10. Ниже приводится порядок расчета для одного участка ( $L = 400$  м).

Т а б л и ц а III.10

Результаты расчета распределения температуры по стволу скважины

Глубина скважины от устья, м	Расстояние от забоя, м	Давление $p_x$ , кгс/см <sup>2</sup>	Коэффициент дросселирования $D_i$ , °С/(кгс/см <sup>2</sup> )	$t$ , °С
0	3400	159,0	—	99,3
1000	2400	177,0	0,191	111,8
2000	1400	195,6	0,128	121,7
3000	400	214,0	0,124	129,1
3400	0	221,4	0,114	131,3
Пласт	—	261,6	0,0972	137,0

Определяем по методике п. III.3. давление на глубине 400 м от забоя

$$p_{400} = 214 \text{ кгс/см}^2.$$

Рассчитываем согласно п. II.7 теплоемкость  $C_p$  для

$$p_{ср} = (p_{пл} + p_3)/2 = 246,5 \text{ кгс/см}^2$$

и начальной температуры  $t_{пл} = 137$  °С

$$C_p = 753 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°С}.$$

Определяем согласно п. II.8  $D_i = 0,0972$  °С/(кгс/см<sup>2</sup>).

По формуле (III.43) рассчитываем

$$\Delta t = 0,0972 (261,6 - 221,4) \frac{\lg \left[ 1 + \frac{54 \cdot 0,6 \cdot 1200 \cdot 0,753 \cdot 8700}{3,14 \cdot 50 \cdot 700 \cdot 0,01} \right]}{\frac{500}{0,1}} = 5,7 \text{ °С},$$

$$t_3 = 137 - 5,7 = 131,3 \text{ °С}.$$

По формуле (III.48) определяем

$$f(\tau) = \ln \left( 1 + \sqrt{\frac{3,14 \cdot 2,3 \cdot 8700}{700 \cdot 0,1}} \right) = 4,56.$$

По формуле (III.46) находим

$$\alpha = 6,28 \cdot 2,3/4,56 \cdot 0,753 \cdot 38 \cdot 800 = 0,000108.$$

Рассчитываем согласно п. II.7 теплоемкость для заданного интервала  $C_p = 13,025$  ккал/кмоль·°С. Для удобства дальнейших расчетов переводим  $C_p$  в ккал/кг·°С, для этого полученную величину делим на массу киломоля  $M$ .

$$C_p = 13,025/17,43 = 0,747 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°С}.$$

Определяем коэффициент дросселирования на рассматриваемом участке ствола согласно п. II.8

$$D_i = 0,114 \text{ °С/(кгс/см}^2\text{)}.$$

Рассчитываем температуру на глубине 400 м по формуле

$$t_{400} = 137 - 0,0325 \cdot 400 \cdot 5,7 e^{-0,000108 \cdot 400} + \frac{1 - e^{-0,000108 \cdot 400}}{0,000108} \left[ 0,0325 - 0,114 \frac{7,4}{400} - \frac{1}{427 \cdot 0,753} \right] = 129,1 \text{ °С}.$$