

# Методика расчётов газоконденсатного объекта (по реализации в коде контроллеров)

19 сентября 2025 г.

## Содержание

<b>1</b>	<b>Лист PVT</b>	<b>3</b>
1.1	Входные данные . . . . .	3
1.2	Параметры смеси . . . . .	3
1.3	Безразмерные параметры . . . . .	3
1.4	Расчёт коэффициента сверхсжимаемости $Z$ . . . . .	3
1.5	Отклонение $Z$ . . . . .	4
1.6	Плотность газа . . . . .	4
1.7	Вязкость газа . . . . .	4
1.8	Объёмный коэффициент газа . . . . .	4
1.9	Выходные данные . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Лист KGF (конденсатгазовый фактор)</b>	<b>5</b>
2.1	Входные данные . . . . .	5
2.2	Аппроксимация экспериментальной зависимости . . . . .	5
2.3	Аппроксимация типовой зависимости . . . . .	5
2.4	Интегральные показатели по экспериментальной кривой . . . . .	5
2.5	Формирование сводной рабочей кривой . . . . .	5
2.6	Выходные данные . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Лист Components (состав по давлению)</b>	<b>6</b>
3.1	Входные данные . . . . .	6
3.2	Алгоритм . . . . .	6
3.3	Выходные данные . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Лист PZ (материальный баланс, <math>p/z</math>)</b>	<b>6</b>
4.1	Входные данные . . . . .	6
4.2	Величины, связанные с PVT . . . . .	7
4.3	Базовые объёмные расчёты . . . . .	7
4.4	Материальный баланс газа (общий вид) . . . . .	7
4.5	Водоприток (модель Хёрста–ван Эверденгена) . . . . .	8
4.6	Пошаговый алгоритм (дискретное время $t_k$ ) . . . . .	8
4.7	Производные и диагностические показатели . . . . .	8
4.8	Выходные данные . . . . .	8

<b>5</b>	<b>Лист GDI (гидродинамические исследования)</b>	<b>9</b>
5.1	Входные данные . . . . .	9
5.2	Средние параметры . . . . .	9
5.3	Гидравлическое сопротивление . . . . .	9
5.4	Устьевое давление . . . . .	9
5.5	Дополнительные параметры . . . . .	9
5.6	Выходные данные . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Лист Productivity (продуктивность скважин)</b>	<b>10</b>
6.1	Входные данные . . . . .	10
6.2	Геометрические и фильтрационные параметры . . . . .	10
6.3	Уравнение продуктивности . . . . .	10
6.4	Расчёт дебита газа . . . . .	10
6.5	Учёт псевдодавления . . . . .	11
6.6	Дебит конденсата . . . . .	11
6.7	Выходные данные . . . . .	11
<b>7</b>	<b>Лист Temperature (устьевое давление и температура)</b>	<b>11</b>
7.1	Входные данные . . . . .	11
7.2	Массовые расходы и эффективная теплоёмкость . . . . .	11
7.3	Итерационный алгоритм $P_{ust}-T_{ust}$ . . . . .	12
<b>8</b>	<b>Лист Base (месячный цикл расчёта)</b>	<b>12</b>
8.1	Входные данные . . . . .	12
8.2	Подготовка календаря и фонда . . . . .	12
8.3	Алгоритм помесячного расчёта . . . . .	13
8.4	Балансы по запасам . . . . .	13
8.5	Выходные данные . . . . .	14

# Введение

Документ описывает порядок вычислений, взаимосвязи формул и ключевые зависимости, реализованные в коде контроллеров: PVT, KGF, Components, PZ (материальный баланс), GDI, Productivity, Temperature, Base. Для каждого модуля приведены: входы, шаги расчёта, формулы и выходы, а также указано, какие результаты используются далее.

## 1 Лист PVT

### 1.1 Входные данные

- Давление пласта  $P_{pl}$  (МПа).
- Температура пласта  $T_{pl}$  (°C).
- Компонентный состав газа:  $y_i$ , молекулярные массы  $M_i$ , критические параметры  $T_{c,i}$ ,  $P_{c,i}$ ,  $V_{c,i}$ ,  $Z_{c,i}$ ,  $\omega_i$ .
- Выбранные методики: метод расчёта  $Z$ , плотности и вязкости.
- Табличные данные  $Z_{факт}$ ,  $\mu_{факт}$  для сравнения.

### 1.2 Параметры смеси

$$M_{mix} = \sum_i y_i M_i, \quad (1)$$

$$T_{c,mix} = \sum_i y_i T_{c,i}, \quad (2)$$

$$P_{c,mix} = \sum_i y_i P_{c,i}. \quad (3)$$

### 1.3 Безразмерные параметры

$$P_r = \frac{P}{P_{c,mix}}, \quad (4)$$

$$T_r = \frac{T_{pl} + 273.15}{T_{c,mix}}, \quad (5)$$

$$\gamma_g = \frac{M_{mix}}{28.96}. \quad (6)$$

### 1.4 Расчёт коэффициента сверхсжимаемости $Z$

В коде реализованы несколько методов:

$$Z = f(P, T, \{y_i\}, \text{метод}). \quad (7)$$

Для уравнения Пенга–Робинсона:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V(V+b) + b(V-b)}, \quad (8)$$

$$\alpha = \left(1 + \kappa(1 - \sqrt{T_r})\right)^2, \quad (9)$$

где  $a, b, \kappa$  определяются через параметры смеси и правила смешения:

$$a = \sum_i \sum_j y_i y_j a_{ij}, \quad a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}), \quad b = \sum_i y_i b_i.$$

Для каждого давления решается кубическое уравнение относительно  $Z$ .

## 1.5 Отклонение $Z$

$$\Delta Z = \frac{Z_{\text{calc}} - Z_{\text{факт}}}{Z_{\text{факт}}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

## 1.6 Плотность газа

$$\rho = \frac{P \cdot M_{\text{mix}}}{Z \cdot R \cdot (T_{\text{pl}} + 273.15)}. \quad (11)$$

## 1.7 Вязкость газа

Используются корреляции:

- Lee–Gonzalez–Eakin:

$$\mu_g = f(T, \rho, M_{\text{mix}}),$$

- Jossi–Stiel–Thodos:

$$\mu_g = f(P, T, Z; T_{c,i}, P_{c,i}, Z_{c,i}).$$

Отклонение:

$$\Delta\mu = \frac{\mu - \mu_{\text{факт}}}{\mu_{\text{факт}}} \cdot 100\%. \quad (12)$$

## 1.8 Объёмный коэффициент газа

$$B_g = \frac{101325 (T_{\text{pl}} + 273.15) Z}{P \cdot 10^6 \cdot 293.15}. \quad (13)$$

## 1.9 Выходные данные

- $P_r, T_r, \gamma_g$ .
- $Z_{\text{calc}}, \Delta Z$ .
- $\rho(P), \rho_{\text{std}}$ .
- $\mu(P), \mu_{\text{std}}, \Delta\mu$ .
- $B_g(P)$ .

Результаты сохраняются в файлы `pvt_output.json`, `output_pvt_results.json`, а также визуализируются графиками  $Z(P)$ ,  $\rho(P)$ ,  $\mu(P)$ ,  $B_g(P)$ .

## 2 Лист KGF (конденсатгазовый фактор)

### 2.1 Входные данные

- Экспериментальные точки:  $\{(P_k, KGF_k^{\text{fact}})\}$ .
- Типовая зависимость  $KGF^{\text{typ}}(P)$  (табличный ряд).
- Давления начала конденсации:  $P_{nk}^{\text{exp}}, P_{nk}^{\text{typ}}$ .

### 2.2 Аппроксимация экспериментальной зависимости

Строится полином 4-й степени (МНК):

$$\widehat{KGF}_{\text{exp}}(P) = AP^4 + BP^3 + CP^2 + DP + E. \quad (14)$$

Помежевая относительная ошибка (MAPE) по точкам:

$$\text{MAPE} = \frac{100}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{\widehat{KGF}_{\text{exp}}(P_k) - KGF_k^{\text{fact}}}{KGF_k^{\text{fact}}} \right| \%. \quad (15)$$

### 2.3 Аппроксимация типовой зависимости

По табличному ряду  $KGF^{\text{typ}}(P)$  строится полином 6-й степени:

$$\widehat{KGF}_{\text{typ}}(P) = AP^6 + BP^5 + CP^4 + DP^3 + EP^2 + FP + G. \quad (16)$$

### 2.4 Интегральные показатели по экспериментальной кривой

По аппроксимации  $\widehat{KGF}_{\text{exp}}(P)$  до  $P_{nk}^{\text{exp}}$  вычисляются:

$$C5^+ = \text{OGR}(P_{\text{pl}}, P_{nk}^{\text{exp}}, \{A, B, C, D, E\}), \quad (17)$$

$$KIK = \text{KIK}(P_{\text{pl}}, P_{nk}^{\text{exp}}, \{A, B, C, D, E\}). \quad (18)$$

(Обе функции реализованы в коде и возвращают интегральные метрики по кривой  $KGF(P)$ .)

### 2.5 Формирование сводной рабочей кривой

На равномерной сетке  $P \in [0.1, 1.1 \cdot \max(P_{nk}^{\text{exp}}, P_{nk}^{\text{typ}})]$ :

$$KGF_{\text{exp}}(P) = \begin{cases} \widehat{KGF}_{\text{exp}}(P), & P \leq P_{nk}^{\text{exp}}, \\ C5^+, & P > P_{nk}^{\text{exp}}, \end{cases} \quad (19)$$

$$KGF_{\text{typ}}(P) = \begin{cases} \widehat{KGF}_{\text{typ}}(P), & P \leq P_{nk}^{\text{typ}}, \\ KGF^{\text{typ}}(P_{nk}^{\text{typ}}), & P > P_{nk}^{\text{typ}}. \end{cases} \quad (20)$$

## 2.6 Выходные данные

- Коэффициенты полиномов:  $\{A, B, C, D, E\}$  и  $\{A, \dots, G\}$ .
- Значения  $C5^+$  и  $KIK$ .
- Сводная таблица  $[P, KGF_{\text{exp}}(P), KGF_{\text{typ}}(P)]$ .
- Графики: экспериментальные точки и аппроксимации; типовая кривая; совмещённое сравнение.

## 3 Лист Components (состав по давлению)

### 3.1 Входные данные

- Таблица компонентного состава газа при  $P = P_{pl}$ :  $\{x_i, M_i, T_{c,i}, P_{c,i}, V_{c,i}, \omega_i\}$ .
- Давление начала конденсации  $P_{nk}$ .
- Методика зависимости: экспериментальные данные или типовая кривая КГФ.

### 3.2 Алгоритм

1. Формируется сетка по давлению:

$$P \in [0.1, P_{nk}], \quad N = 30 \text{ точек.}$$

2. Для каждого компонента  $i$  вычисляется мольная доля как функция давления:

$$x_i(P) = \text{Composition}\left(P, P_{nk}, \text{метод}, x_i^{(0)}, i\right), \quad (21)$$

где  $x_i^{(0)}$  — исходная мольная доля при  $P_{pl}$ ,  $i = 0..11$ .

3. Полученная таблица  $\{P, x_i(P)\}$  сохраняется в JSON.
4. Строятся графики  $x_i(P)$  (например,  $CH_4(P), C_2H_6(P), C_3H_8(P)$ ).

### 3.3 Выходные данные

- Таблица компонентного состава по давлению:  $[P, x_1, \dots, x_{12}]$ .
- JSON-файл `components_output.json`.
- Графики изменения мольных долей компонентов от давления.

## 4 Лист PZ (материальный баланс, p/z)

### 4.1 Входные данные

- Стартовые условия пласта:  $P_i, T_{\text{res}}$  (постоянная пластовая температура).
- Накопленный отбор газа по времени:  $G_p(t_k)$ .

- (Опц.) Накопленный отбор при предельном давлении и другие статистики добычи.
- Балансовые запасы (если заданы):  $N$ .
- Геометрия залежи: газонасыщенная толщина  $h$ , пористость  $\phi$ , водонасыщенность  $S_w$ .
- Параметры аквифера (если учитывается водоприток):  $k_w$ ,  $\phi_w$ ,  $R_a$ ,  $h_a$ ,  $\theta$ ,  $\mu_w$ .
- Методики из PVT: выбор формулы для  $Z(P)$ ,  $\rho(P)$ ,  $\mu(P)$ ; объёмный коэффициент  $B_g(P)$ .

## 4.2 Величины, связанные с PVT

Для каждого  $P$  рассчитываются:

$$Z(P) = Z_{\text{calc}}(P, T_{\text{res}}), \quad (22)$$

$$B_g(P) = \frac{101325 (T_{\text{res}} + 273.15) Z(P)}{P \cdot 10^6 \cdot 293.15}. \quad (23)$$

Здесь  $B_g$  — объёмный коэффициент газа (привязка к используемым в коде единицам).

## 4.3 Базовые объёмные расчёты

При известных балансовых запасах:

$$V_{\text{plast}} = N B_g(P_i), \quad (24)$$

$$A_{\text{plast}} = \frac{V_{\text{plast}}}{h}. \quad (25)$$

Если  $N$  не заданы, то из линейной формы материального баланса для сухого газа

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} - \frac{G_p}{G}$$

оценка начальных запасов  $G$  находится из наклона регрессии по точкам  $(G_p, p/z)$ :

$$\text{slope} = -\frac{1}{G} \Rightarrow G = -\frac{1}{\text{slope}}. \quad (26)$$

## 4.4 Материальный баланс газа (общий вид)

В общем случае (с водопритоком и сжимаемостями) баланс записывается как

$$G_p = G \left( \frac{p_i}{z_i} - \frac{p}{z} \right) - \underbrace{\frac{B_w}{B_g} W_e}_{\Delta_w} - \underbrace{G F_{ct}(p)}_{\Delta_{comp}}, \quad (27)$$

где

- $W_e$  — кумулятивный водоприток,
- $B_w$  — объёмный коэффициент воды (принят константой или по табличному значению),

- $F_{ct}(p)$  — слагаемое суммарной сжимаемости порового пространства и жидкости (в коде учитывается агрегированно).

Из (27) может быть выражено давление  $p$  как решение целевой функции

$$\text{MBAL\_fP}(p; \{G, G_p, W_e, F_{ct}, Z(P)\}) = 0,$$

которая в коде решается численно при каждом  $t_k$ .

## 4.5 Водоприток (модель Хёрста–ван Эверденгена)

Водоприток считается как свёртка ядра отклика аквифера с историей депрессии:

$$W_e(t_k) = \sum_{j=1}^k P_a(t_k - t_{j-1}) (\bar{p}_{j-1} - \bar{p}_j), \quad (28)$$

где  $P_a(\cdot)$  — функция отклика (зависит от  $k_w, \phi_w, R_a, h_a, \theta, \mu_w$ ), а  $\bar{p}_j$  — среднее пластовое давление на шаге  $j$ . В коде это реализовано в виде функции `Mbal_Hurst` с расчётом эффективного радиуса дренирования и накопленного  $W_e$ .

## 4.6 Пошаговый алгоритм (дискретное время $t_k$ )

1. По  $P_{k-1}$  вычислить  $Z_{k-1} = Z(P_{k-1})$ ,  $B_{g,k-1} = B_g(P_{k-1})$ .
2. По истории до  $t_k$  обновить  $W_e(t_k)$  (если учитывается аквифер).
3. Решить уравнение материального баланса (27) относительно  $P_k$ :

$$\text{MBAL\_fP: } F(P_k) = G\left(\frac{p_i}{z_i} - \frac{P_k}{Z(P_k)}\right) - \frac{B_w}{B_g(P_k)} W_e(t_k) - G F_{ct}(P_k) - G_p(t_k) = 0.$$

4. Сохранить  $P_k, Z(P_k), \frac{P_k}{Z(P_k)}$ .

## 4.7 Производные и диагностические показатели

$$\left(\frac{P}{Z}\right)_{\text{fact}}, \quad \left(\frac{P}{Z}\right)_{\text{calc}} = \frac{P_k}{Z(P_k)}, \quad \text{невязка} = \left(\frac{P}{Z}\right)_{\text{fact}} - \left(\frac{P}{Z}\right)_{\text{calc}}. \quad (29)$$

Показатели по аквиферу:

$$\text{заполнение, \%} = 100 \cdot \frac{W_e}{V_{\text{plast}}}, \quad H_{\text{подъёма}} = \frac{W_e}{A_{\text{plast}}}. \quad (30)$$

## 4.8 Выходные данные

- Таблица по времени:  $P_{\text{calc}}, Z_{\text{calc}}, (P/Z)_{\text{calc}}, W_e$ , показатели заполнения и подъёма.
- (Опц.) Оценка  $G$  по наклону линии  $p/z-G_p$ , если  $N$  не задан.
- Графики:  $P/Z$  vs  $G_p$  (факт/расчёт),  $P$  vs  $G_p$  (факт/расчёт).



## 5 Лист GDI (гидродинамические исследования)

### 5.1 Входные данные

- Пластовое давление  $P_{\text{res}}$  и забойное  $P_{\text{bhp}}$ .
- Дебиты газа  $q$ .
- Геометрия НКТ: диаметр  $D$ , шероховатость  $\epsilon$ , длина  $L$ , глубина  $H$ .
- Пластовая и устьевая температуры  $T_{\text{pl}}, T_{\text{ust}}$ .
- Методы расчёта  $Z$ , плотности и вязкости (из модуля PVT).

### 5.2 Средние параметры

$$P_{\text{mean}} = \frac{P_{\text{res}} + P_{\text{bhp}}}{2}, \quad (31)$$

$$\Delta(P^2) = P_{\text{res}}^2 - P_{\text{bhp}}^2. \quad (32)$$

### 5.3 Гидравлическое сопротивление

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  вычисляется через функцию Ld:

$$\lambda = \text{Ld}(P_{\text{mean}}, T_{\text{mean}}, q, D, \epsilon). \quad (33)$$

Коэффициент трения (пример: Коулбрук–Уайт/Черчилль)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right), \quad \text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad v = \frac{4Q}{\pi D^2}. \quad (34)$$

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right]^{1/12}, \quad A = \left\{ -2 \log_{10} \left[ \left( \frac{\epsilon}{3.7D} \right)^{1.11} + \frac{2.457}{\text{Re}} \right] \right\}^2, \quad B = \left( \frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16}. \quad (35)$$

### 5.4 Устьевое давление

По функции Pust определяется устьевое давление:

$$P_{\text{ust}} = f(P_{\text{bhp}}, q, D, \epsilon, \gamma_g, L, T_{\text{ust}}, T_{\text{pl}}, Z, \mu, \rho, \lambda). \quad (36)$$

Падение давления в стволе (Дарси–Вейсбах + столб)

$$\frac{dP}{dz} = \rho g + \frac{2f \rho v^2}{D} + \rho v \frac{dv}{dz}, \quad \Delta P \approx \underbrace{\bar{\rho} g H}_{\text{гидростатика}} + \underbrace{\frac{2\bar{f} \bar{\rho} L \bar{v}^2}{D}}_{\text{трение}} + \underbrace{\bar{\rho} \bar{v} \Delta v}_{\text{ускорение (опц.)}}. \quad (37)$$

### 5.5 Дополнительные параметры

Для проверки пересчитываются свойства при средних условиях:

$$Z_{\text{ср}} = Z(P_{\text{mean}}, T_{\text{mean}}), \quad (38)$$

$$\rho_{\text{ср}} = \rho(P_{\text{mean}}, T_{\text{mean}}), \quad (39)$$

$$\mu_{\text{ср}} = \mu(P_{\text{mean}}, T_{\text{mean}}). \quad (40)$$

## 5.6 Выходные данные

- Таблица по  $q$ :  $\Delta(P^2)$ ,  $P_{\text{уст}}^{\text{факт}}$ ,  $P_{\text{уст}}^{\text{расч}}$ .
- Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$ .
- Графики:
  1. Зависимость  $\Delta(P^2)$  от дебита  $q$ .
  2. Сравнение  $P_{\text{уст}}$  (факт и расчёт).

## 6 Лист Productivity (продуктивность скважин)

### 6.1 Входные данные

- Пластовое давление  $P_{\text{res}}$ , забойное давление  $P_{\text{bhp}}$ .
- Параметры пласта: проницаемость  $k$ , толщина  $h$ , радиус дренирования  $R$ , радиус скважины  $r_w$ , скин-фактор  $s$ .
- Свойства газа:  $Z(P)$ ,  $\mu(P)$  (из листа PVT).
- Газоконденсатный фактор  $KGF(P)$  (из листа KGF).

### 6.2 Геометрические и фильтрационные параметры

$$T = \frac{2\pi kh}{\mu B \left( \ln \frac{R}{r_w} + s \right)}, \quad (41)$$

$$\lambda(P) = \frac{P}{Z(P) \mu(P)}. \quad (42)$$

### 6.3 Уравнение продуктивности

Используется квадратичная форма Роулинса–Шеллхарта:

$$\frac{P_{\text{res}}^2 - P_{\text{bhp}}^2}{q} = A + Bq, \quad (43)$$

где  $A, B$  — эмпирические коэффициенты (определяются из результатов исследования скважины).

### 6.4 Расчёт дебита газа

$$q = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(P_{\text{res}}^2 - P_{\text{bhp}}^2)}}{2B}. \quad (44)$$

## 6.5 Учёт псевдодавления

При использовании псевдодавления:

$$m(P) = \int \frac{2P}{\mu(P)Z(P)} dP \approx \frac{P}{\mu(P)Z(P)}, \quad (45)$$

уравнение продуктивности переписывается как

$$q = \frac{m(P_{\text{res}}) - m(P_{\text{bhp}})}{A^* + B^*q}. \quad (46)$$

## 6.6 Дебит конденсата

Определяется через газовый дебит и  $KGF(P)$  при среднем давлении:

$$Q_{\text{cond}} = \frac{KGF\left(\frac{P_{\text{res}} + P_{\text{bhp}}}{2}\right)}{1000} \cdot Q_{\text{gas}}. \quad (47)$$

## 6.7 Выходные данные

- Газовый дебит  $Q_{\text{gas}}$  для заданного  $P_{\text{bhp}}$ .
- Дебит конденсата  $Q_{\text{cond}}$ .
- Кривые продуктивности  $q(P_{\text{bhp}})$ .

# 7 Лист Temperature (устьевое давление и температура)

## 7.1 Входные данные

- Дебиты: газ  $Q_{\text{gas}}$  (тыс. м<sup>3</sup>/сут), конденсат  $Q_{\text{cond}}$  (т/сут).
- Свойства при ст. усл.: плотность газа  $\rho_{\text{std}}$ , плотность конденсата  $\rho_{\text{cond}}$ .
- Геометрия и режим: глубина  $H$ , длина НКТ  $L$ , диаметр  $D$ , шероховатость  $\epsilon$ , время работы  $t$ .
- Температуры: пластовая  $T_{\text{pl}}$ , начальная устьевая  $T_{\text{ust}}^{(0)}$ .
- Теплофизические параметры: теплоёмкости  $c_{p,\text{gas}}$ ,  $c_{p,\text{cond}}$ , теплопроводности колонн/породы ( $\lambda$  и т. п.), параметры мерзлоты (если есть).
- Методы/функции: расчёт  $Z(P, T)$ ,  $\mu(P, T)$ ,  $\rho(P, T)$  (из PVT), гидросопротивление  $L_d$ , устьевое давление  $P_{\text{ust}}$ , устьевая температура  $T_{\text{ust}}$ .

## 7.2 Массовые расходы и эффективная теплоёмкость

$$\dot{m}_g = \frac{Q_{\text{gas}} \cdot 10^3}{24} \rho_{\text{std}} \quad [\text{кг/ч}], \quad (48)$$

$$\dot{m}_o = \frac{Q_{\text{cond}}}{24} \rho_{\text{cond}} \quad [\text{кг/ч}], \quad (49)$$

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_o, \quad c_{p,\text{mix}} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} c_{p,\text{gas}} + \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}} c_{p,\text{cond}}. \quad (50)$$

### 7.3 Итерационный алгоритм $P_{\text{ust}}-T_{\text{ust}}$

1. **Шаг 0.** Принять начальную устьевую температуру  $T_{\text{ust}}^{(0)}$ .

2. **Шаг 1.** Рассчитать устьевое давление по гидравлике ствола:

$$P_{\text{ust}}^{(0)} = \text{Pust}\left(P_{\text{bhp}}, Q_{\text{gas}}, D, \epsilon, L, T_{\text{ust}}^{(0)}, T_{\text{pl}}, Z, \mu, \rho, \lambda\right).$$

3. **Шаг 2.** Рассчитать устьевую температуру по теплопередаче:

$$T_{\text{ust}}^{(1)} = \text{Tust}\left(T_{\text{pl}}, \dot{m}, c_{p,\text{mix}}, \lambda, t, H, P_{\text{bhp}}, P_{\text{ust}}^{(0)}\right).$$

4. **Шаг 3.** Пересчитать устьевое давление при обновлённой температуре:

$$P_{\text{ust}}^{(1)} = \text{Pust}\left(\dots; T_{\text{ust}}^{(1)}\right).$$

5. **Шаг 4.** Ещё один шаг теплопередачи:

$$T_{\text{ust}}^{(2)} = \text{Tust}\left(\dots; P_{\text{ust}}^{(1)}\right).$$

6. **Критерий.** При необходимости выполнить третий проход:

$$P_{\text{ust}}^{(2)} = \text{Pust}\left(\dots; T_{\text{ust}}^{(2)}\right), \quad T_{\text{ust}}^{(3)} = \text{Tust}\left(\dots; P_{\text{ust}}^{(2)}\right).$$

#### Эффективная теплоотдача и устьевая температура

$$U_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{\alpha_i} + R + R + \frac{1}{\alpha_o}\right)^{-1}, \quad T_{\text{ust}} = T_{\text{pl}} - (T_{\text{pl}} - T_{\text{rp}}) \exp\left(-\frac{U_{\text{eff}} L}{\dot{m} c_{p,\text{mix}}}\right). \quad (51)$$

Здесь  $\alpha_i, \alpha_o$  — внутренний/внешний коэффициенты теплоотдачи,  $R, R$  — термосопротивления стенки/изоляции,  $T_{\text{rp}}$  — эффективная температура окружающей среды/породы.

## 8 Лист Base (месячный цикл расчёта)

### 8.1 Входные данные

- Начальные запасы: газ  $N$ , конденсат  $N^{\text{cond}}$  (если заданы).
- Пластовые условия и геометрия:  $P_{\text{pl},0}$ ,  $T_{\text{pl}}$ , толщина  $h$ , площадь  $A$ , пористость  $\phi$ , насыщенности.
- Производственные данные: календарь месяцев  $\{m\}$ , длительность  $L_m$  (сут), фонд скважин  $N(m)$ , коэффициенты эксплуатации  $K_{\text{экспл}}(m)$ .
- Связанные модули: PVT ( $Z, \mu, \rho, B_g$ ), KGF ( $KGF(P)$ ), Components ( $y_i(P)$ ), PZ/MBAL ( $P_{\text{pl}}(Q^{\text{нак}})$ ), Productivity ( $q(P_{\text{bhp}})$ ), Temperature/GDI ( $P_{\text{ust}}, T_{\text{ust}}$ ).

### 8.2 Подготовка календаря и фонда

Среднедействующий фонд:

$$N_{\text{mean}}(m) = K_{\text{экспл}}() \bar{N}(m), \quad \bar{N}(m) = \frac{1}{L_m} \int_{t \in m} N(t) dt. \quad (52)$$

### 8.3 Алгоритм помесечного расчёта

Для каждого месяца  $m = 1, 2, \dots$  выполняется:

1. **Пластовое давление (MBAL):**

$$P_{pl}^{\text{start}}(m) = \text{MBAL\_fP}(Q^{\text{нак}}(m-1)).$$

2. **Забойное давление:** задать/оценить  $P_{\text{bhp}}(m)$  (по ограничениям или связи  $P_{pl} - \Delta P$ ).

3. **Гидросопротивление:**

$$\lambda(m) = \text{Ld}(P_{\text{mean}}, T_{\text{mean}}, q, D, \epsilon).$$

4. **Дебит одной скважины (Productivity):**

$$q_{\text{base}}(m) = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(P_{pl}^{\text{start}}(m)^2 - P_{\text{bhp}}(m)^2)}}{2B}.$$

5. **Добыча газа по фонду:**

$$Q_{\text{gas}}(m) = \frac{L_m N_{\text{mean}}(m) q_{\text{base}}(m)}{1000} \quad [\text{МЛН М}^3].$$

6. **Кумулятив:**

$$Q^{\text{нак}}(m) = Q^{\text{нак}}(m-1) + Q_{\text{gas}}(m).$$

7. **Уточнение  $P_{pl}$ :**

$$P_{pl}^{\text{end}}(m) = \text{MBAL\_fP}(Q^{\text{нак}}(m)).$$

8. **Конденсат (через KGF):**

$$Q_{\text{cond}}(m) = \frac{KGF\left(\frac{P_{pl}^{\text{start}}(m) + P_{\text{bhp}}(m)}{2}\right)}{1000} Q_{\text{gas}}(m).$$

9. **Устьевые параметры (Temperature/GDI):**

$$P_{\text{ust}}(m) = \text{Pust}(\cdot), \quad T_{\text{ust}}(m) = \text{Tust}(\cdot).$$

10. **Скорости и вынос жидкости:**

$$v_{\text{bhp}}(m) = \frac{4 q_{\text{base}}}{\pi D^2}, \quad v_{\text{ust}}(m) = \frac{4 Q_{\text{газ, пов}}}{\pi D^2}, \quad \text{проверка } v > v_{\text{min}} \quad (\text{Tochigin}).$$

11. **Компонентные показатели:** оценка долей  $\text{C}_3\text{--C}_4$  (Composition\_calc) и добычи СПБТ.

### 8.4 Балансы по запасам

$$OIZ_{\text{gas}}(m) = OIZ_{\text{gas}}(m-1) - Q_{\text{gas}}(m), \quad (53)$$

$$OIZ_{\text{cond}}(m) = OIZ_{\text{cond}}(m-1) - Q_{\text{cond}}(m). \quad (54)$$

## 8.5 Выходные данные

- Сводная помесечная таблица (JSON):  $P_{pl}^{\text{start/end}}$ ,  $P_{\text{bhp}}$ ,  $q_{\text{base}}$ ,  $Q_{\text{gas}}$ ,  $Q_{\text{cond}}$ ,  $P_{\text{ust}}$ ,  $T_{\text{ust}}$ ,  $v_{\text{bhp}}$ ,  $v_{\text{ust}}$ ,  $OIZ_{\text{gas}}$ ,  $OIZ_{\text{cond}}$  и пр.
- Графики: добычи газа/конденсата, траектории пластового давления, устьевые параметры, балансы ОИЗ, критерий выноса жидкости.

## Глоссарий символов

$P, T$	давление, температура (МПа, °C)
$Z$	коэффициент сверхсжимаемости (–)
$\mu, \rho$	вязкость (мПа·с), плотность (кг/м <sup>3</sup> )
$B_g$	объёмный коэффициент газа (м <sup>3</sup> <sub>пл</sub> /м <sup>3</sup> <sub>ст</sub> )
$KGF$	конденсатогазовый фактор (г/м <sup>3</sup> или т/млн м <sup>3</sup> )
$f$	коэффициент трения Дарси–Вейсбаха (–)
$D, L, H$	диаметр, длина, глубина колонны (м)
$\epsilon$	эквивалентная шероховатость (м)
$Q, q$	объёмный расход/дебит (м <sup>3</sup> /с, тыс. м <sup>3</sup> /сут)

## Единицы и конвертация

Во всех формулах придерживаемся СИ; при работе с табличными данными используем `siunitx` и явно указываем переходы (например, МПа ↔ Па, тыс. м<sup>3</sup>/сут ↔ м<sup>3</sup>/с).

## Соответствие переменных коду

Символ	В методичке	В коде (пример)
$P_{\text{ust}}$	устьевое давление	<code>Pust(...)</code>
$f$	коэффициент трения	<code>Ld(...)</code>
$T_{\text{ust}}$	устьевая температура	<code>Tust(...)</code>
$P/Z$	псевдодавление (простое)	<code>pz_controller: P/Z</code>

## Структуры данных и результаты

Модули сохраняют промежуточные/итоговые результаты в JSON (например, `pvt_output.json`, `components_output.json`, `temperature_output.json`). Рекомендуется описать ключевые поля (имя поля, единицы, краткое описание) для воспроизводимости.