

## Расчёт смеси «Пропан-бутан»

Переходное состояние от жидкости к газу – это двухфазная среда. Давайте решим вот такую задачу на смесь пропана с бутана.

Новый пустой баллон емкостью 27 литров (переменная  $V$ ) для хранения пропана-бутана (сжиженного углеводородного газа – СУГ или LCG) поставили на весы и зафиксировали его массу в 14,5 кг ( $m_1$  – см. начало расчета на рис. 1). Затем этот баллон заправили сжиженным газом так, что масса баллона стала равна 25 кг ( $m_2$ ). Определить объемы и массы жидкой и газообразной частей (фаз) в баллоне, если температура баллона и газа в нем стала равной температуре окружающей среды 20°C ( $T$ ). Массовая доля пропана равна 60% (переменная *Propane*), а бутана 40% (переменная *Butane*). Это соотношение бывает летним и зимним. Дело в том, что пропан намного дороже бутана и его экономят. Но зимой долю пропана приходится увеличивать, чтобы давление в баллоне оставалось достаточно высоким, газ "кипел" и сам без дополнительного насоса (турбины) поступал в горелки котлов и кухонных плит или в цилиндры автомобилей, многие из которых "ездыт" на СПГ. Пропорция 60/40 зимняя. Летом долю пропана можно снизить до 40 и менее процентов.

$$V := 27 \text{ L} \quad m_1 := 14.5 \text{ kg} \quad m_2 := 25 \text{ kg} \quad T := 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$m_{Air} := V \cdot \text{CoolProp_Props}("D", "T", T, "P", 1 \text{ atm}, "Air") = 32.52 \text{ g} \quad (2)$$

$$m_1 := m_1 - m_{Air} = 14.47 \text{ kg} \quad m := m_2 - m_1 = 10.53 \text{ kg} \quad (3)$$

$$\text{Propane} := 60 \% \quad \text{Butane} := 100 \% - \text{Propane} = 40 \% \quad (4)$$

$$\text{Propane} := \text{num2str}(\text{Propane}, "n5") = "0.6" \quad (5)$$

$$\text{Butane} := \text{num2str}(\text{Butane}, "n5") = "0.4" \quad (6)$$

$$\text{Смесь} := \text{concat}("Propane", "[", \text{Propane}, "]" \& \text{Butane}["", \text{Butane}, ", "]") \quad (7)$$

$$\text{Смесь} = "Propane[0.6] \& Butane[0.4]" \quad (8)$$

$$\text{CoolProp_Props}("P", "T", T, "Q", 0, "Butane") = 2.049 \text{ atm} \quad (9)$$

$$p := \text{CoolProp_Props}("P", "T", T, "Q", 0, \text{Смесь}) = 5.615 \text{ atm} \quad (10)$$

$$\text{CoolProp_Props}("P", "T", T, "Q", 0, "Propane") = 8.255 \text{ atm} \quad (11)$$

$$\rho_G := \text{CoolProp_Props}("D", "T", T, "Q", 1, \text{Смесь}) = 8.624 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (12)$$

$$\rho_L := \text{CoolProp_Props}("D", "T", T, "Q", 0, \text{Смесь}) = 536.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (13)$$

$$Q := \text{solve}\left(\frac{Q \cdot m}{\rho_G} + \frac{(1-Q) \cdot m}{\rho_L} = V, Q, 0, 1\right) = 6.137 \% \quad (14)$$

$$m_G := m \cdot Q = 64.64 \text{ g} \quad m_L := m \cdot (1-Q) = 10.47 \text{ kg} \quad (15)$$

$$V_G := \frac{m_G}{\rho_G} = 7.495 \text{ L} \quad V_L := \frac{m_L}{\rho_L} = 19.51 \text{ L} \quad (16)$$

## Рис. 1. Расчет смеси пропана и бутана

На рис. 1 показан ввод исходных данных (п. 1), расчет массы воздуха в пустом баллоне (2) и массы баллона  $m$  с выкаченным из него воздухом (3). Воздух в пустом баллоне можно и не учитывать, но почему бы его не учесть, если это так легко сделать на компьютере.

В пункте 4 задаются массовые доли пропана и бутана в смеси, которые далее переводятся из чисел в строки (п.п. 5 и 6), которые далее формируют строковую переменную *Смесь* (п.п. 7 и 8). Используется встроенные в SMath функции `num2str` (перевод числа в строку) и `concat` (сцепление строк, включая квадратные скобки и знак `&`). Далее (п.п. 9, 10 и 11) рассчитываются давления насыщения (упругость) чистого бутана (п. 9), смеси 60/40 (п. 10) и чистого пропана (п. 11). Видно, что упругость пропана выше. Поэтому его и больше в зимней смеси. Используется единица давления атмосфера физическая (760 мм ртутного столба), а не мегапаскали, чтобы сразу было видно, насколько давление в баллоне превышает атмосферное. Давление, полученное в расчете, естественно абсолютное, а не избыточное, какое бы показал манометр, установленный на баллоне. К показанию манометра нужно еще прибавить значение атмосферного давления, считанного с барометра.

В п.п. 12 и 13 рассчитываются плотности газа и жидкости пропан-бутановой смеси в нашем баллоне. Далее решается уравнение материального баланса (п. 14), по которому определяется массовая доля  $Q$  газа в баллоне (выведено в промилле) и массы газа и жидкости (п. 15).

Если же температуру сделать равной не 20, а минус 25°C, то пропан закипит при 2.008 атм, а бутан при 0,3544 атм, то есть при давлении, ниже атмосферного. Поэтому-то, повторяем, долю бутана в зимней смеси уменьшают, разбавляя (обогащая) его более дорогим пропаном.

Здесь, конечно, нужно, как и в случае со смесью этанола с водой, проверить, правильные ли значения плотности выдают функции на рис. 1. В Интернете, где продублированы данные из бумажных справочников, есть много таких таблиц и графиков. Пара из них из них показана на рис. 2. Таблица плотности (рис. 2а) окружена расчетными данными. Легко заметить несовпадения в "угловых" данных (чистый пропан или чистый бутан). Данные из таблицы даны в скобках. Не такое существенное (кричащее), какое мы видели на рис. 5.7, но опять же несовпадение. В центре таблицы (смесь) можно также увидеть несовпадение плотностей: согласно расчету на рис. 1 плотность жидкой смеси пропана с бутаном в соотношении 60/40 при 20°C равна 0.5367, а согласно таблице на рис. 2 – 0.529 тонн на метр кубический. Правда, настораживает тот факт, что в таблице на рис. 2 в отличие от таблицы на рис. 5.5 не указано явно, о какой доле идет речь – о массовой, объемной или молярной. Не прописано также, что речь идет о плотности именно жидкой фазы – см. нуль, какой задается для параметра "Q" у функций с именем  $\rho$  на рис. 1 и 2. Такое умолчание – беда многих подобных таблиц и бумажных, и интернетовских.

Из графика (рис. 2б) видно, что данные по давлению насыщения (упругости паров) более-менее совпадают для бутана. В случае с пропаном наблюдается довольно существенное несовпадение. На рис. 2а всё наоборот.

Отсюда вывод, который прописан в названии этого раздела учебного пособия – доверяй, но проверяй. Кстати, на сайте CoolProp в инструкциях «мелким шрифтом» написано, что со смесями жидкостей нужно работать очень осторожно, так как часто выдается неправильный результат. Но кто из нас читает инструкции!? Бесплатный сыр бывает только в мышеловке. А пакет CoolProp – это бесплатный несертифицированный пакет. Сертифицированный пакет – это WaterSteamPro, о котором говорилось в главе 2 этого учебного пособия.

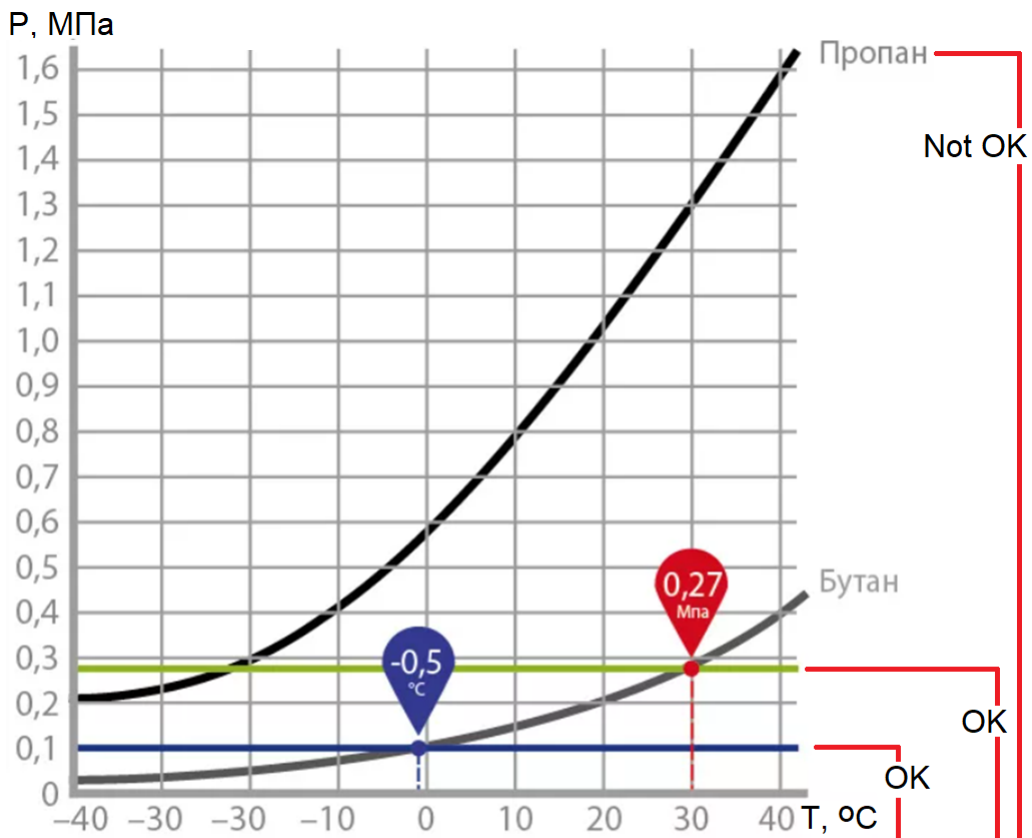
$$M := \begin{matrix} \text{"P, \% \ T, }^\circ\text{C"} & -25 & -20 & -15 & -10 & -5 & 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 \\ 100 & 559 & 553 & 548 & 542 & 535 & 528 & 521 & 514 & 507 & 499 & 490 \\ 90 & 565 & 559 & 554 & 548 & 542 & 535 & 528 & 521 & 514 & 506 & 498 \\ 80 & 571 & 565 & 561 & 555 & 548 & 541 & 535 & 528 & 521 & 514 & 505 \\ 70 & 577 & 572 & 567 & 561 & 555 & 548 & 542 & 535 & 529 & 521 & 513 \\ 60 & 583 & 577 & 572 & 567 & 561 & 555 & 549 & 542 & 536 & 529 & 521 \\ 50 & 589 & 584 & 579 & 574 & 568 & 564 & 556 & 549 & 543 & 536 & 529 \\ 40 & 595 & 590 & 586 & 579 & 575 & 568 & 562 & 555 & 550 & 543 & 536 \\ 30 & 601 & 596 & 592 & 586 & 581 & 575 & 569 & 562 & 557 & 551 & 544 \\ 20 & 607 & 603 & 598 & 592 & 588 & 582 & 576 & 569 & 565 & 558 & 552 \\ 10 & 613 & 609 & 605 & 599 & 594 & 588 & 583 & 576 & 572 & 566 & 559 \\ 0 & 619 & 615 & 611 & 605 & 601 & 595 & 590 & 583 & 579 & 573 & 567 \end{matrix}$$

$$D(T, P) := \begin{cases} x := \frac{T}{K} - 273.15 \\ y := 100 \cdot P \\ X := \text{submatrix}(M, 1, 1, 2, \text{cols}(M)) \\ Y := \text{submatrix}(M, 2, \text{rows}(M), 1, 1) \\ Z := \text{submatrix}(M, 2, \text{rows}(M), 2, \text{cols}(M)) \\ \text{InterpBilinear}(X, Y, Z, x, y) \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{cases}$$

$$D(20^\circ\text{C}, 0.4) = 543 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Рис.2. Создание функции пользователя – плотность смеси пропана и бутана)

Повторить расчет, показанный на рис. 1, используя функцию пользователя с именем D (рис. 2), а не встроенную функцию из пакета CoolProps Wrapper!



CoolProp\_Props ("P"; "T"; (-0,5) °C; "Q"; 1; "Butane") = 0,1013 МПа

CoolProp\_Props ("T"; "P"; 0,27 МПа; "Q"; 1; "Butane") = 28,39 °C

CoolProp\_Props ("P"; "T"; 40 °C; "Q"; 1; "Propane") = 1,369 МПа

b)

Рис. 2. Сравнение табличных и расчетных данных по пропану и бутану: а) плотность, б) упругость