

Дано:

Давление на входе:	$p := 3 \text{ ата}$	$p = 3.039 \text{ бар}$	$p = 0.304 \text{ МПа}$
Кислород O ₂ - 41%	$O_2 := 0.41$	$M_{O_2} := 32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$	
Аргон Ar - 59%	$Ar := 0.59$	$M_{Ar} := 40 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$	
Чистота получаемого продукта:	марка - 2,2	$Ar' := 0.992$	
Получаемый продукт:	Ar		
Фазовое состояние получаемого продукта:	ж		
Расход смеси:	$G_{см0} := 19.19 \frac{\text{т}}{\text{день}}$		

Требуется: Выбрать ТМОА для разделения смеси испарительными методами. Рассчитать тепломассообменный аппарат для разделения заданной смеси испарительными методами. Использовать в расчете два метода и посчитать минимальную удельную работу разделения для заданных условий. Посчитать коэффициент извлечения по целевому компоненту.

1. Определим молярную массу, молярный расход смеси, приведенной к системе СИ:

$$M_{см} := M_{O_2} \cdot O_2 + M_{Ar} \cdot Ar = 0.037 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$G_{см} := \frac{G_{см0}}{M_{см}} = 5.487 \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

2. Смесь, подающаяся в колонну должна быть насыщенной (s - saturated), тогда:

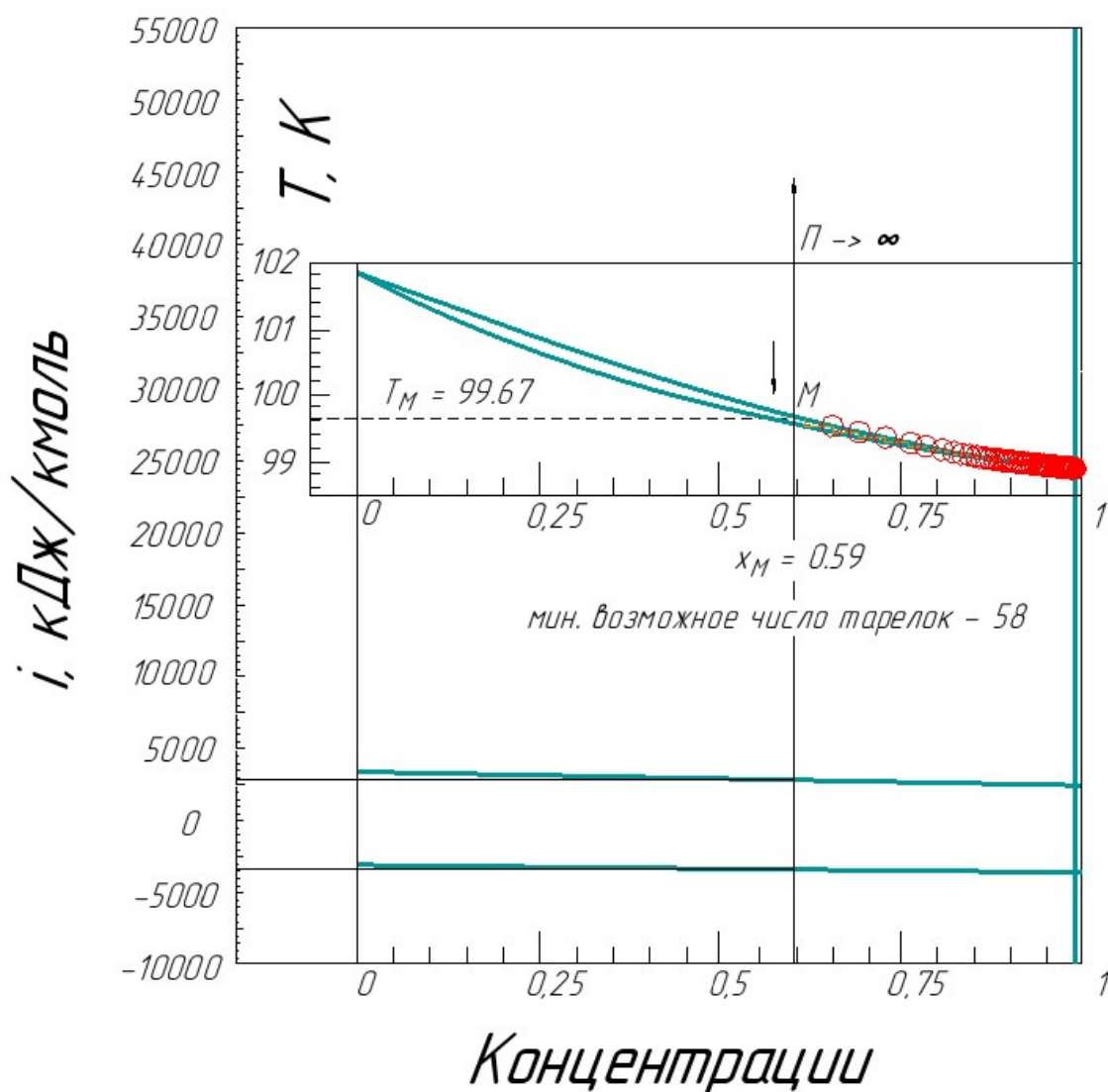
1: argon/oxygen: V/L sat. p=0,3039 MPa, q=0 to 1 (0,59/0,41)

	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Density (kg/m ³)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)
1	99,917	0,30390	1225,9	-106,75	2,2528
2	99,929	0,30390	131,89	-90,150	2,4189
3	99,940	0,30390	69,627	-73,510	2,5854
4	99,952	0,30390	47,264	-56,831	2,7523
5	99,965	0,30390	35,755	-40,109	2,9196
6	99,977	0,30390	28,740	-23,344	3,0873
7	99,990	0,30390	24,016	-6,5346	3,2554
8	100,00	0,30390	20,619	10,322	3,4240
9	100,02	0,30390	18,058	27,227	3,5930
10	100,03	0,30390	16,058	44,183	3,7625
11	100,05	0,30390	14,453	61,192	3,9325

Диапазон температур на входе - 99,17..10,05 К (задаюсь температурой 99,67 К)

Рассмотрим диапазон потенциально возможных нагрузок. Для этого, на диаграмме Поншена-Бошняковича рассмотрим вариант где минимальный полюс бесконечно удален (можно определить минимально возможное число тарелок). А также случай когда процесс массообмена максимально благоприятен (равновесен).

Бесконечно удаленный полюс (100% жидкость на входе):



Минимально возможно 58 тарелок.

$$x_R := 0.59 \quad (= x_M) \quad q_k := \infty \quad d := 0.91$$

$$M = A_p + R \quad (1)$$

$$M \cdot y_M = A_p \cdot x_{A_p} + R \cdot y_R \quad (2)$$

$$M \cdot y_M \cdot i_M = A_p \cdot x_{A_p} \cdot i'_{A_p} + R \cdot x_R \cdot i''_R \quad (3)$$

$$Q_{dp} := d \cdot R \cdot (i''_R - i'_R) = 28.324 \text{ кВт}$$

$$Q_{k_min} := M \cdot y_M \cdot i_M - (A_p \cdot x_{A_p} \cdot i'_{A_p} + R \cdot x_R \cdot i'_R) = 0 \text{ кВт}$$

$$\beta_{min} := \frac{x_{A_p} \cdot A_p}{y_M \cdot M} = 0$$

Решатель Начальные приближения

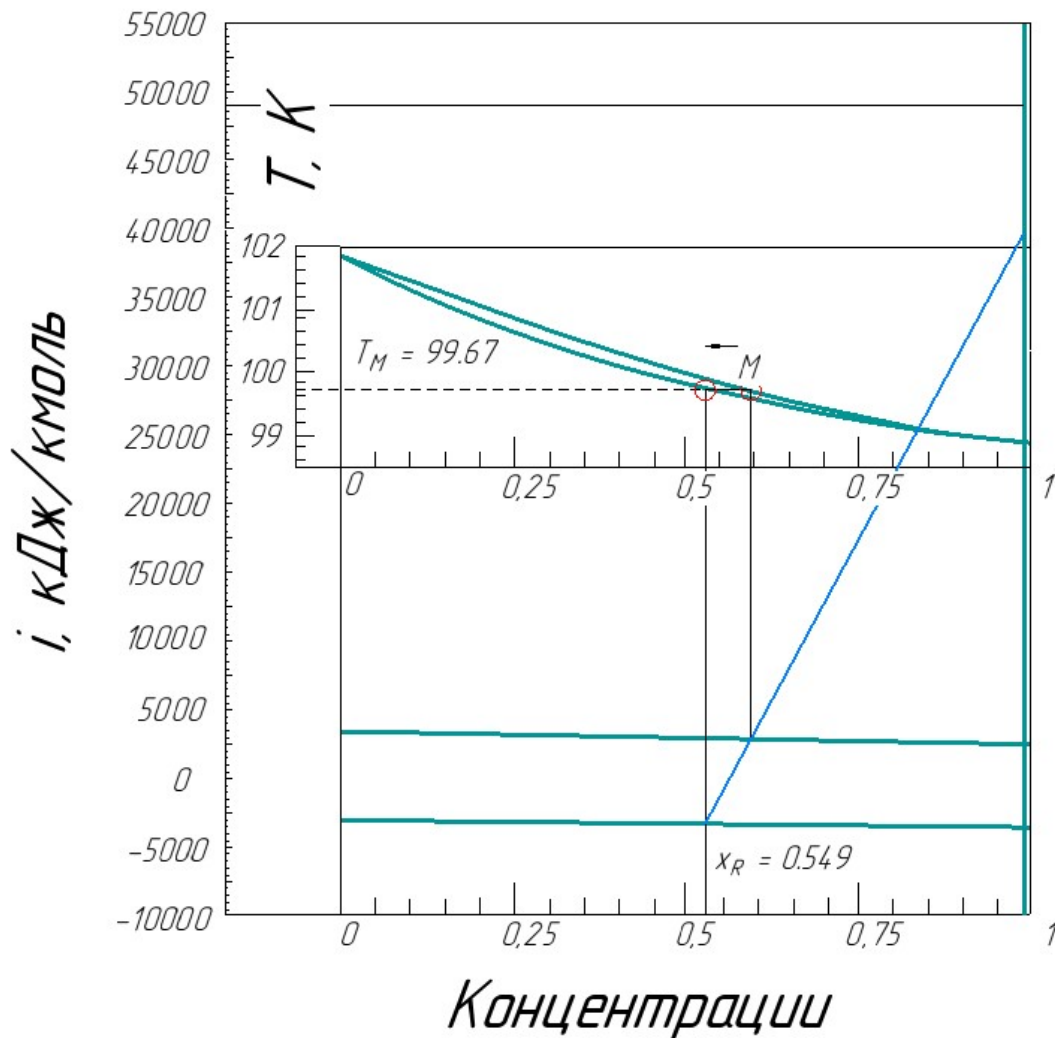
$$A_p := 1 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{с}} \quad R := 1 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

$$M = A_p + R$$

$$M \cdot y_M = A_p \cdot x_{A_p} + R \cdot x_R$$

$$\text{find}(A_p, R) = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.487 \end{bmatrix} \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

Минимально возможный полюс (100% пар на входе):



$$x_R := 0.549$$

$$d := 0.91$$

$$M = A_p + R \quad (1)$$

$$M \cdot y_M = A_p \cdot x_{Ap} + R \cdot y_R \quad (2)$$

$$M \cdot y_M \cdot i_M = A_p \cdot x_{Ap} \cdot i'_{Ap} + R \cdot x_R \cdot i''_R \quad (3)$$

$$Q_{dp} := d \cdot R \cdot (i''_R - i'_R) = 26.653 \text{ кВт}$$

$$Q_{k_max} := M \cdot y_M \cdot i_M - (A_p \cdot x_{Ap} \cdot i'_{Ap} + R \cdot x_R \cdot i'_R) = 10.627 \text{ кВт}$$

$$\beta_{max} := \frac{x_{Ap} \cdot A_p}{y_M \cdot M} = 0.156$$

Решатель с членом приближения

$$A_p := 1 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{с}} \quad R := 1 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

$$M = A_p + R$$

$$M \cdot y_M = A_p \cdot x_{Ap} + R \cdot x_R$$

$$\text{find}(A_p, R) = \begin{bmatrix} 0.508 \\ 4.979 \end{bmatrix} \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

Получается, что максимально возможный к-т извлечения это 0.156. И для поддержания массообменных процессов в колонне, требуется реализовывать диапазон от 0 до 10,627 кВт холода. И то, что процессы реализуемы энергетически без подвода внешней тепловой нагрузки ($Q_{dp} > Q_k$), однако требуется отводить часть отбросного потока (R') во избежание переизбытка жидкости в нижнем кубе колонны.

$$Q_{ap} := \begin{bmatrix} 28.324 \\ 26.653 \end{bmatrix}$$

$$Q_k := \begin{bmatrix} 0 \\ 10.627 \end{bmatrix}$$

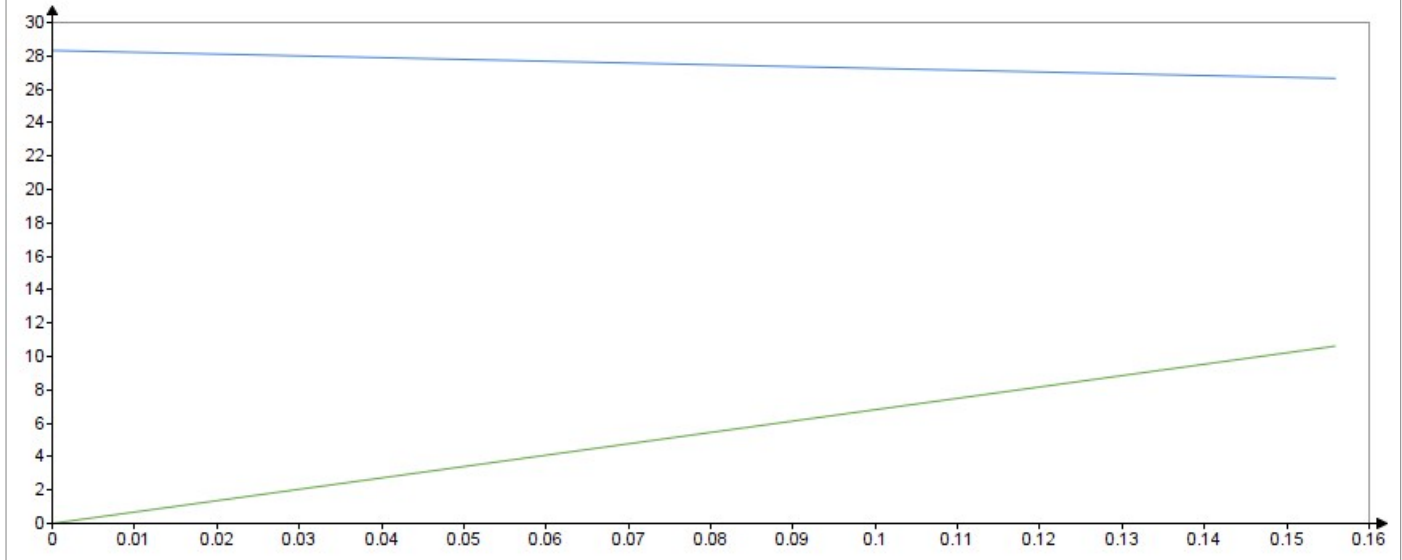
$$\beta := \begin{bmatrix} 0 \\ 0.156 \end{bmatrix}$$

$$X_1 := \beta$$

$$X_2 := \beta$$

$$Y_1 := Q_{ap}$$

$$Y_2 := Q_k$$



Необходимо, чтобы Q_k и Q_{ap} пересеклись в одной точке, отвести от колонны часть отбросного потока R' .

$$R' := 1 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

$$d \cdot (R - R') \cdot (i''_R - i'_R) = 10.627 \cdot \text{кВт}$$

$$\text{find}(R') = 2.994 \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

Начальные условия

Тогда придется отводить от колонны $R' := 2.994 \cdot \frac{\text{моль}}{\text{с}}$ потока R . Схема колонны и балансы примут следующий вид:

$$M = A_p + R + R'$$

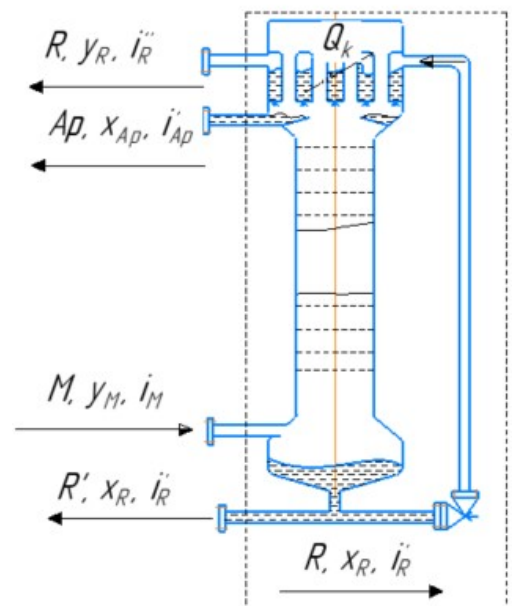
$$M \cdot y_M = A_p \cdot x_{Ap} + R \cdot y_R + R' \cdot x_R$$

$$M \cdot y_M \cdot i_M = A_p \cdot x_{Ap} \cdot i'_{Ap} + R \cdot y_R \cdot i''_R + R' \cdot x_R \cdot i'_R$$

(1)

(2)

(3)



4. Уравнения баланса в колонне:

$$M = A_p + R + R' \quad (1)$$

$$M \cdot y_M = A_p \cdot x_{A_p} + R \cdot y_R + R' \cdot x_R \quad (2)$$

$$M \cdot y_M \cdot i_M = A_p \cdot x_{A_p} \cdot i'_{A_p} + R \cdot y_R \cdot i''_R + R' \cdot x_R \cdot i'_R \quad (3)$$

Зададимся коэффициентом
извлечения по аргону равным:

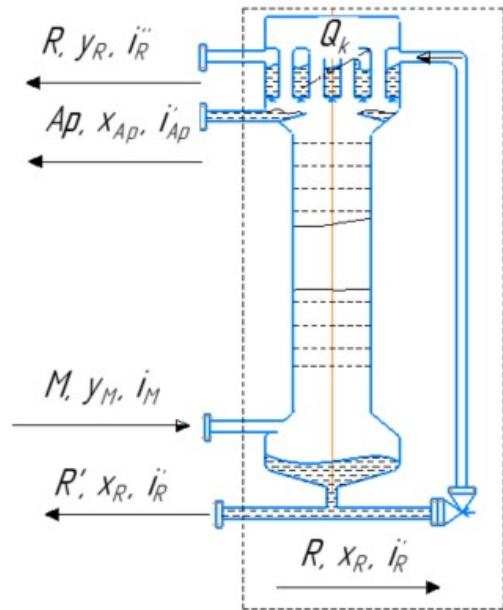
$$\beta := 0.15$$

$$\frac{x_{A_p} \cdot A_p}{y_M \cdot M} = \beta$$

$$A_p := \frac{\beta \cdot y_M \cdot M}{x_{A_p}} = 0.49 \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

$$R := M - A_p - R' = 2.004 \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

$$\text{Тогда } y_R := \frac{M \cdot y_M - A_p \cdot x_{A_p} - R' \cdot x_R}{R} = 0.553$$



Зная фазовый состав по компоненту, давление в колонне, можно определить энтальпии потоков, и определить Q_k: (энтальпии выходных потоков фиксированно определяются)

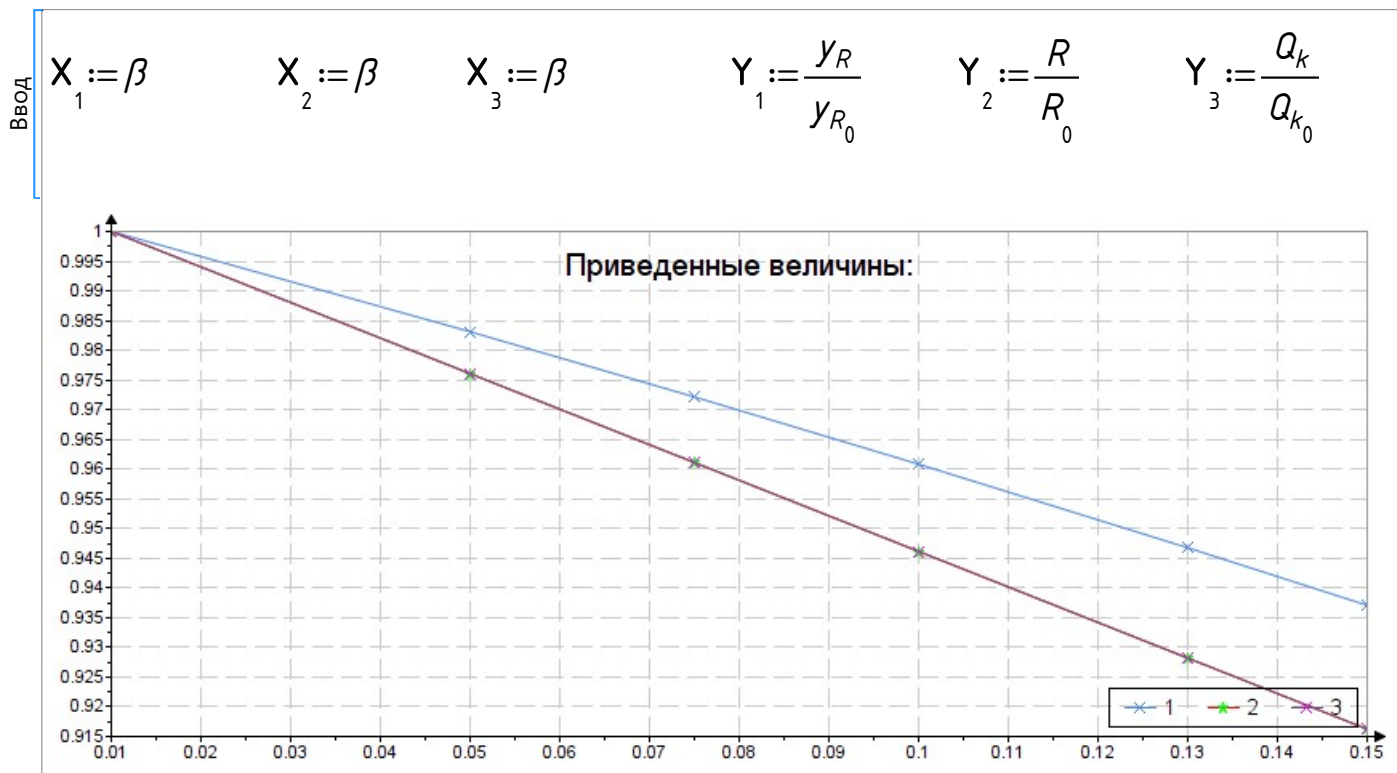
$$i_M := -414 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \quad i'_{A_p} := -4165.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \quad i''_R := 2272.6 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \quad r_{A_r} := 6339 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

4*. Оптимизация по к-ту извлечения (доп. информация):

Зададимся к-том извлечения по аргону вариативно:

$$\beta := \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.05 \\ 0.075 \\ 0.1 \\ 0.13 \\ 0.15 \end{bmatrix} \quad A_p := \frac{\beta \cdot y_M \cdot M}{x_{A_p}} = \begin{bmatrix} 0.033 \\ 0.163 \\ 0.245 \\ 0.326 \\ 0.424 \\ 0.49 \end{bmatrix} \frac{\text{моль}}{\text{с}} \quad R := M - A_p = \begin{bmatrix} 5.455 \\ 5.324 \\ 5.242 \\ 5.161 \\ 5.063 \\ 4.998 \end{bmatrix} \frac{\text{моль}}{\text{с}}$$

$$y_R := \frac{M \cdot y_M - A_p \cdot x_{A_p}}{R} = \begin{bmatrix} 0.588 \\ 0.578 \\ 0.571 \\ 0.565 \\ 0.556 \\ 0.551 \end{bmatrix} \quad Q_k := R \cdot r_{A_r} = \begin{bmatrix} 34.577 \\ 33.749 \\ 33.232 \\ 32.715 \\ 32.094 \\ 31.68 \end{bmatrix} \text{ кВт}$$



Можно сделать вывод о том, что с ростом к-та извлечения падают y_R , R и Q_k . Т.е. чем больше β , тем ближе к $y = x$.

При уменьшении расхода отбросного потока, уменьшается тепловая нагрузка, реализуемая для отвода теплоты конденсации в конденсаторе. Поэтому, если принять большой к-т извлечения, то потребуются дросселировать отбросной поток до вакуума.

Энтальпия i''_R сдросселированного отбросного потока принята при давлении 1.2 бар (дросселирование до атмосферного давления с запасом на гидрпотери).

Брать Q_k (или β) больше предельных явно не стоит, поскольку тогда система может быть энергетически нереализуема, за исключением: 1) отбросной поток будет дросселироваться до вакуума; 2) В конденсатор будет подводиться дополнительный холод, "извне".

5. Уравнения баланса в конденсаторе:

$$(1) \quad R + G = R + A_p + g$$

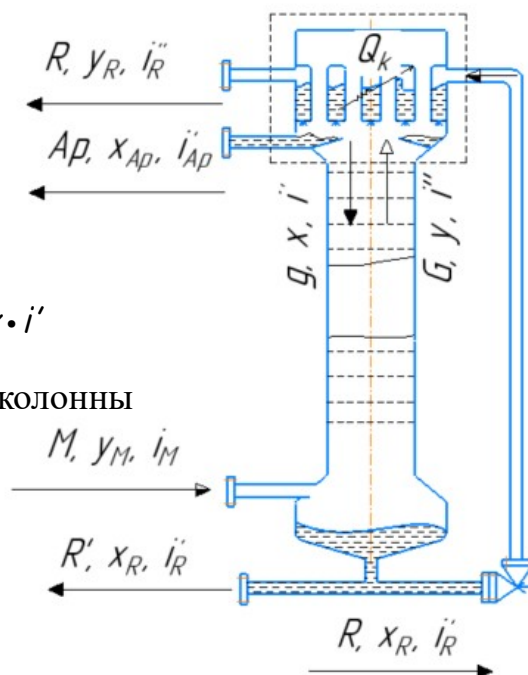
$$(2) \quad R \cdot y_R + G \cdot y = R \cdot y_R + A_p \cdot x_{Ap} + g \cdot x$$

$$(3) \quad R \cdot y_R \cdot i_R + G \cdot y \cdot i'' = R \cdot y_R \cdot i''_R + A_p \cdot x_{Ar} \cdot i'_{Ar} + g \cdot x \cdot i'$$

Отсюда можно вывести уравнение рабочей линии колонны (с учетом приближений Мак-Кеба и Тиле):

$$y = \frac{g}{G} \cdot x + \frac{A_p \cdot x_{Ap}}{G}$$

$$F = \frac{g}{G} = \operatorname{tg}(\alpha) \quad \text{где} \quad G = \frac{q_k}{r_{Ar}}$$



6. Расчет минимальной удельной работы разделения для заданных условий:

Минимальная работа, которая необходима для разделения газовой смеси, равна сумме работ изотермического сжатия каждого компонента от его парциального давления до давления смеси (1), однако, результатом разделения в текущей задаче будет жидкий аргон, тогда общая работа будет суммой минимальных работ разделения и ожижения (2).

$$(1) \quad L_{min.p} = -RT \sum_i y_i \cdot \ln\left(\frac{p}{p_i}\right) \quad (2) \quad L_{min} = T_0 \cdot (S - S_0) - (i - i_0)$$

T_0 - температура О.С.

S, i - начальные параметры смеси на входе

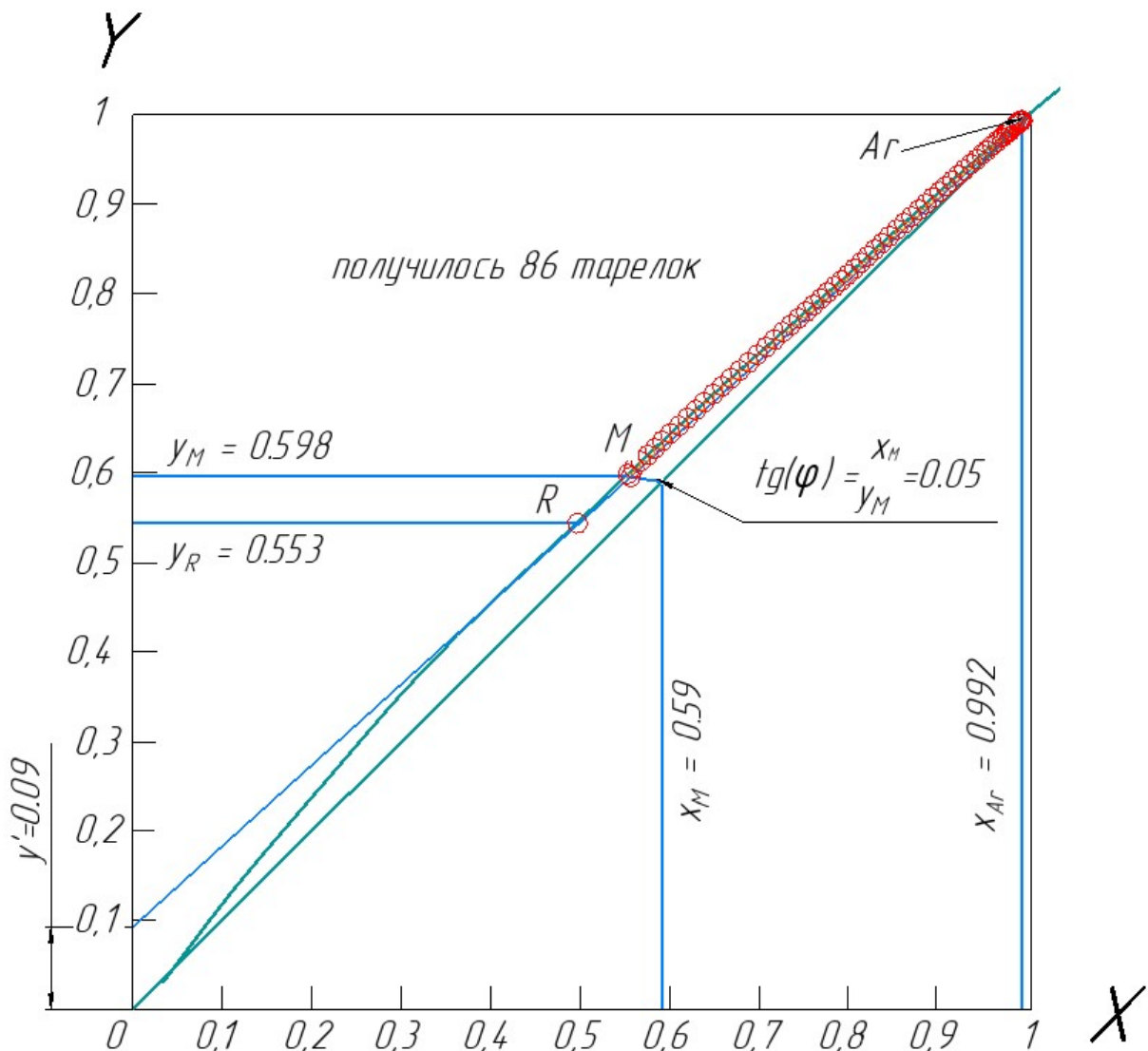
S_0, i_0 - параметры получаемого компонента

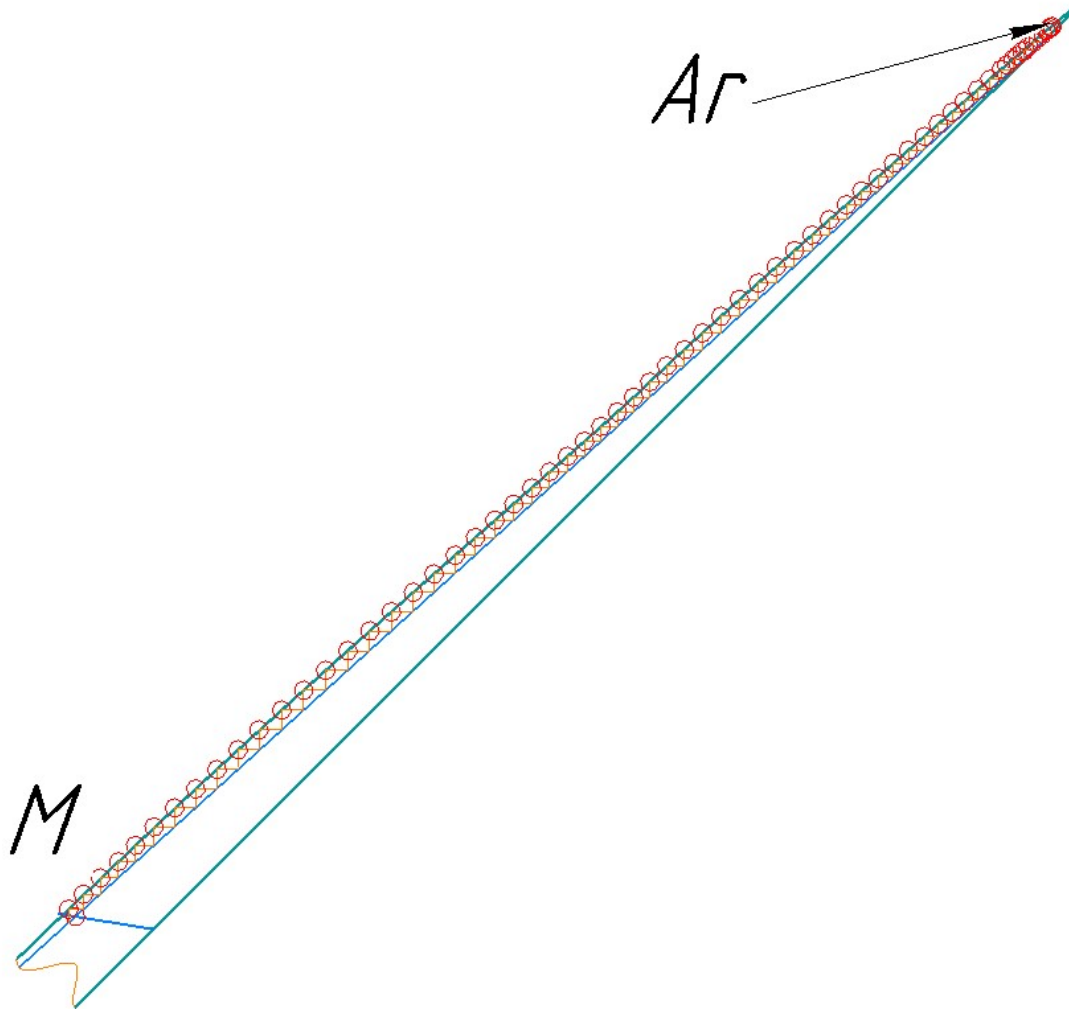
Тогда $T_0 := 293.1 \text{ K}$

$$S := 133.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}} \quad S_0 := 26.71 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}} \quad i := -5162 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \quad i_0 := -10320 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$L_{min} := T_0 \cdot (S - S_0) - (i - i_0) = 26112.839 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

7. Расчет колонны методом МакКэба-Тиле:





В результате графического расчета получилось, что для разделения смеси с получением конечного компонента заданной частоты, требуется **86** теоретических тарелок. $n_1 := 86$

Для определения количества реальных тарелок, вводится коэфф-т эффективности или КПД тарелки, введем КПД тарелки:

$$E_{Tw} = \frac{y_n - y_{n-1}}{y' - y_{n-1}} \quad \eta_m := 0.6 \quad \text{тогда} \quad n_d := \frac{n_1}{\eta_m} = 143.333 \text{ тарелок}$$

8. Расчет колонны методом Поншена - Бошняковича:

Строится изотерма, принадлежащая точке вводимого потока и вертикаль концентрации продукционного потока. Пересечение этих прямых даст отрезок минимально возможной тепловой нагрузки в конденсаторе.

Определяется координата т. П исходя из заданных ранее параметров колонны (к-т извлечения, теплота конденсации).

Флегмовое отношение и число будут определяться по следующим отношениям:

$$F = \frac{g}{G} = \frac{z - y}{z - x} = \frac{l - i''}{l - i'} \quad F = \frac{f}{f + 1}$$

Расчет параметров для минимального полюса:

$$\zeta_{min} := 0.998$$

$$i' := -3413.6 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$I_{min} := 43341.46 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i'' := 2742.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

Тогда $F_{min} := \frac{l_{min} - i''}{l_{min} - i'} = 0.868$

Зная F_{\min} , можно найти f_{\min} :

$$f_{min}:=1 \quad F_{min}=\frac{f_{min}}{f_{min}+1} \quad \text{find}(f_{min})=6.595$$

Расчет параметров для реального (выбранного) полюса:

$$\zeta := 0.998$$

$$i' := -3489.7 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$I := 52418.21 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i'' := 2273.4 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$Toz\partial a \quad F:=\frac{|-i''}{|-i'}=0.897$$

Зная F , можно найти f :

$$f := 1 \quad F = \frac{f}{f+1} \quad \text{find } \langle f \rangle = 8.701$$

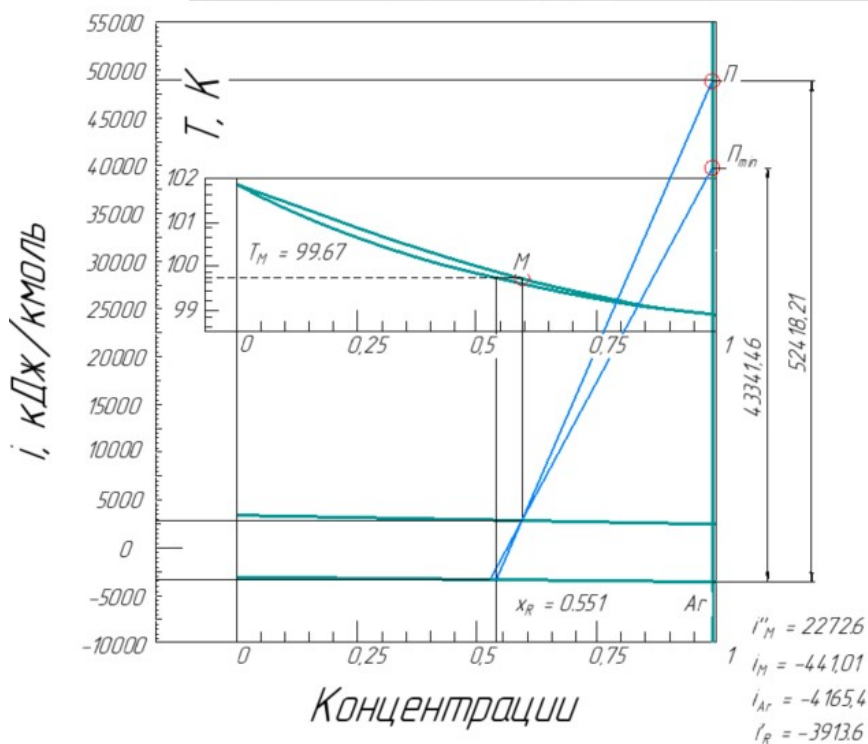
Реальное флегмовое число уже известно. Поэтому можно определить коэффициент запаса k : $fr = k \cdot f_{min}$. Чем выше коэффициент запаса, тем шире «галочка», образованная коннодами и изотермами:

$$f_{min} := 6.595$$

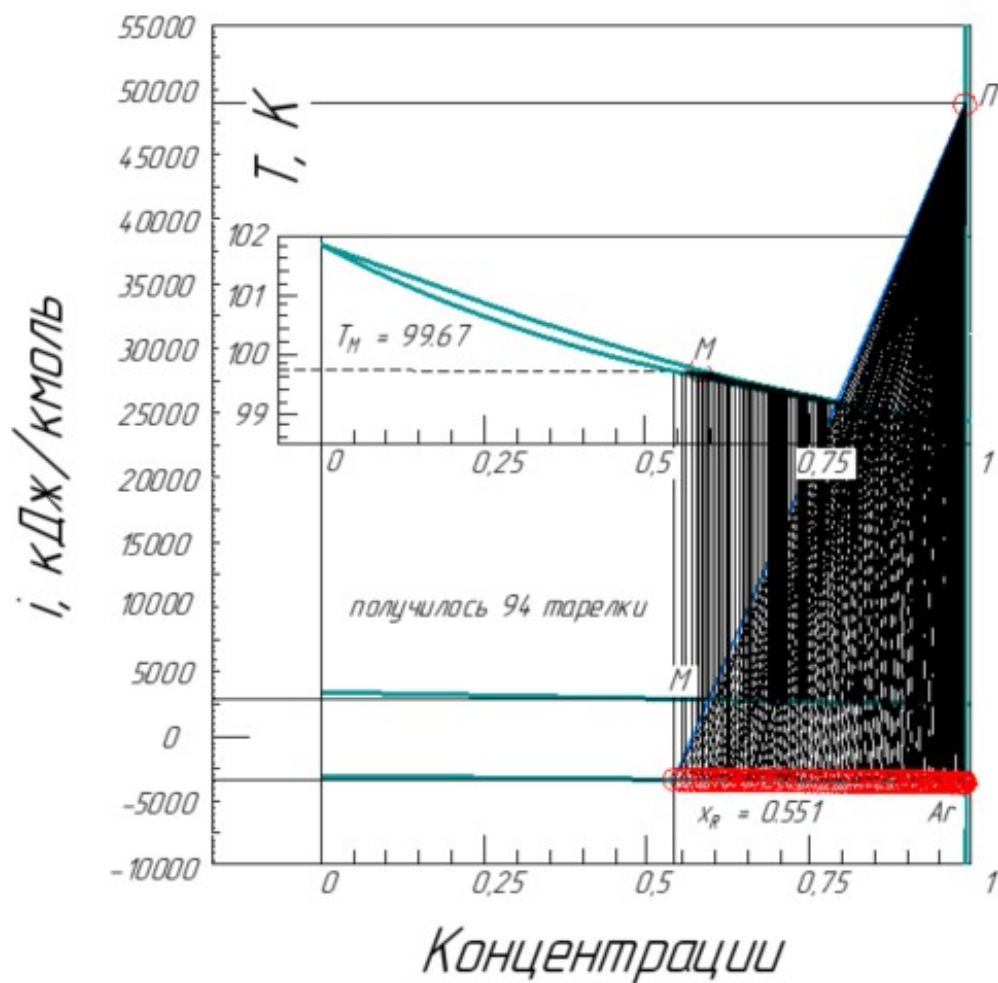
$$f := 8.701$$

možda

$$k := \frac{f}{f_{min}} = 1.319$$



Теперь следует строить много изотерм и коннод, настолько много, что не стоит разделять аргон и кислород, таким образом приближаясь к $\zeta_{н.с.} = \text{const}$:



В результате графического расчета получилось, что для разделения смеси с получением конечного компонента заданной частоты, требуется 94 идеальных теоретических тарелок.

Для определения количества реальных тарелок, вводится коэфф-т эффективности или КПД тарелки, введем КПД тарелки:

$$n_2 := 94 \quad \eta_m := 0.6 \quad n_d := \frac{n_2}{\eta_m} = 156.667$$

тарелок

