



## **Příloha 2**

### **Разобранные примеры для обучения**



## Грибы

### 1. Задание:

Два предпринимателя – один из Чехии и один из Германии, договорились о бизнесе, который заключался в том, что в приграничных областях Германии будут собирать грибы (массовая доля воды в которых составляет 90%) и, далее, они будут подвергаться сушке в Чехии для понижения массовой доли воды до 50%. После этого, грибы будут переправляться в Германию, где немецкие партнёры досушат их до 10-и процентного содержания воды. Доход от продажи сушёных грибов будет разделен поровну между немецкой и чешской стороной. Остальные расходы, которые несут партнёры – примерно одинаковы. Нам необходимо выяснить если договоренность является выгодной для обеих сторон.

### 2. Балансная схема:

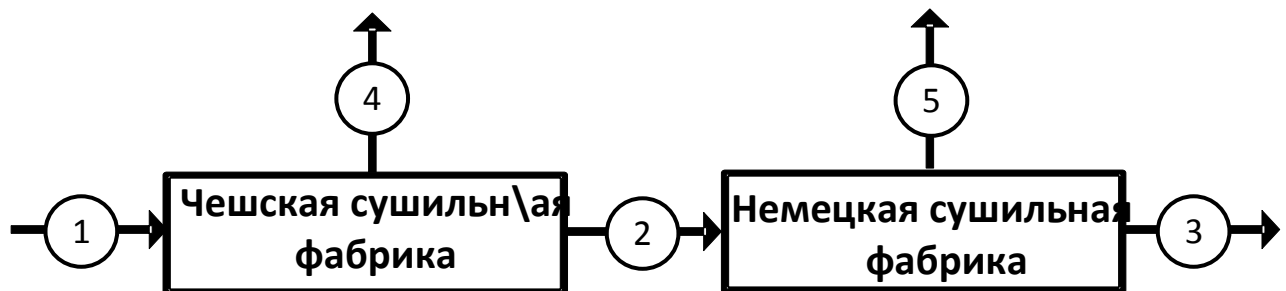


Рисунок 1

### 3. Технологические параметры:

Содержание воды в свежих грибах	0,9
Содержание воды в грибах, после сушки в Чехии	0,5
Содержание воды в грибах, после сушки в Германии	0,1

Таблица 1

**4. Список токов, компонентов и технологических единиц:**

Список токов и их компонентов		Список компонентов		Список технологических единиц			
1	сушёные грибы + вода	1	сушёные грибы	1	Чешская сушильная фабрика		
2	сушёные грибы + вода	2	вода	2	Немецкая сушильная фабрика		
3	сушёные грибы + вода						
4	вода						
5	вода						

Таблица 2

**4. Основы расчёта:**

Балансная величина	массовый ток
Единицы балансной величины	кг/с

Таблица 3

**5. Эталонный поток:**

m11+m12	1	кг/с
---------	---	------

Таблица 4

**6. Дополнительные вычисления и перерасчёты: концентрация элементов в токах (кг/Σ кг):**

Свежие грибы			
ток	элемент	концентрация	
1	1	0,90	кг/Σ кг
1	2	0,10	кг/Σ кг
		<b>1,00</b>	кг/Σ кг
Полусухие грибы			
ток	элемент	концентрация	
2	1	0,50	кг/Σ кг
2	2	0,50	кг/Σ кг
		<b>1,00</b>	кг/Σ кг
Готовые грибы			
ток	элемент	концентрация	
3	1	0,10	кг/Σ кг
3	2	0,90	кг/Σ кг
		<b>1,00</b>	кг/Σ кг

Таблица 5



**7. Матрица инцидентности (МИ).** Она выражает отношение между технологическими единицами и токами. Входящий ток обозначаем как «+1», выходящий как «-1». Ток, не имеющий отношения к данной единице имеет обозначение «0».

технологическая единица	ТОКИ				
	1	2	3	4	5
чешская фабрика	1	-1	0	-1	0
немецкая фабрика	0	1	-1	0	-1

Таблица 6

**8. Таблица данных (ТД).** Данная матрица показывает наличие или отсутствие элемента в токе. «1», если элемент присутствует, «0», если элемент отсутствует.

элемент	ТОКИ				
	1	2	3	4	5
вода	1	1	1	1	1
сушёные грибы	1	1	1	0	0

Таблица 7

**9. Количество неизвестных параметров (nX).** С помощью данного действия мы выясним размер матрицы коэффициентов. Формула для вычисления:

$$nX = \text{СУММПРОИЗВ (ТД)} + \text{количество независимых химических реакций} \quad (1)$$

nX	8
----	---

Таблица 8

**10. Матрица количества балансных уравнений (МБУ).** Эта матрица характеризует количество появлений элементов в токах. Для расчёта данной матрицы мы используем следующую формулу:

$$\text{МБУ} = \text{МУМНОЖ (ТД; ТРАНСП(ABS(МИ)))} \quad (2)$$



элемент	технологическая	
	единица	
	чешская фабрика	немецкая фабрика
вода	3	3
сушёные грибы	2	2

Таблица 9

**11. Количество балансных уравнений (nY).** Для определения количества балансных уравнений, мы должны посчитать количество ненулевых членов МБУ.

$$nY = \text{СЧЁТЕСЛИ}(\text{МБУ}, ">0") \quad (3)$$

nY	4
----	---

Таблица 10

**12. Количество требуемых дополнительных условий.** Эти данные мы получим с помощью простого вычисления разности параметров nX и nY.

$$дУ = nX - nY \quad (4)$$

дУ	4
----	---

Таблица 11

**13. Формулировка дополнительных условий.** Всегда необходимо определить минимально один эталонный поток хотя бы одного элемента или целого тока. Далее, существуют три вида дополнительных условий, которые возможно использовать для создания решаемой системы линейных уравнений:

А) Известный поток элемента в одном из токов – подобный тип уравнения, как и в случае эталонного потока.

Б) Известная концентрация элемента в одном из токов.

В) Известное соотношение между количеством двух элементов.

Эталонный поток		
ток	элемент	начение
1	1+2	1 кг/с

Таблица 12

Концентрация элементов		
ток	элемент	концентрация
1	1	0,73319 кг/Σ кг
2	1	0,58835 кг/Σ кг
3	1	0,09957 кг/Σ кг

Таблица 13



**14. Матрица коэффициентов (А) и вектор свободных членов (В).** Как и все предыдущие матрицы, данная матрица тоже должна иметь квадратный вид и, в нашем случае, представляет систему из 8-и линейных уравнений ( $nX = 8$ ), которая составлена из 4-х балансов массы и 4-х дополнительных условий. Столбец свободных членов содержит данные о значении каждого уравнения.

	технологическая единица	элемент												B
ток	A		1	1	2	2	3	3	4	5				
элемент			1	2	1	2	1	2	1	1				
неизвестная			m1;1	m1;2	m2;1	m2;2	m3;1	m3;2	m4;1	m5;1				
	1	1	1	0	-1	0	0	0	-1	0		0		
	1	2	0	1	0	-1	0	0	0	0		0		
	2	1	0	0	1	0	-1	0	0	-1		0		
	2	2	0	0	0	1	0	-1	0	0		0		
	эталонный ток		1	1	0	0	0	0	0	0		1		
	концентрация тока 1		0,2668	-0,7332	0	0	0	0	0	0		0		
	концентрация тока 2		0	0	0,4116	-0,5884	0	0	0	0		0		
	концентрация тока 3		0	0	0	0	0,9004	-0,0996	0	0		0		

Таблица 14

**15. Проверка решаемости матрицы коэффициентов (А).** Для того, чтобы приступить к следующим действиям по вычислению решения, нам необходимо проверить решаемость данной матрицы. После того, как мы убедимся в том, что количество столбцов равно количеству рядов, необходимо вычислить определитель по следующей формуле:

$$\text{ОПРЕДЕЛИТЕЛЬ} = \text{МОПРЕД} (A) = -0,3707 \quad (5)$$

В случае правильно составленной матрицы определитель выйдет ненулевым.

**16. Вектор неизвестных (X).** Чтобы прийти к конечному решению и вычислить вектор X, содержащий данные по всем неизвестным, воспользуемся следующей формулой:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (6)$$



Или, в Excel она будет выглядеть так:

$$X = \text{МУМНОЖ}(\text{МОБР}(A);B) \quad (7)$$

m1;1	m1;2	m2;1	m2;2	m3;1	m3;2	m4;2	m5;2
0,733185	0,266815	0,381345	0,266815	0,029504	0,266815	0,351841	0,351841
кг/с	кг/с	кг/с	кг/с	кг/с	кг/с	кг/с	кг/с

Таблица 15

Единицы измеряемых величин – [кг/с], поэтому теперь мы можем выяснить какая из сторон выпаривает больше воды и, соответственно, тратит больше энергии:

$$m_{4;2}/m_{5;2} = 1 \quad (8)$$

Это значит, что расходы по сушке одинаковы, следовательно, данный бизнес выгоден для обеих сторон и партнёры потратят примерно одинаковое количество энергии на выпаривание воды в Чехии и Германии.



## Производство соды

### 1. Условие задачи:

В колонне реагирует насыщенный водной раствор соли ( $\text{NaCl}$ ) с газообразной смесью аммиака ( $\text{NH}_3$ ) и диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), вызывая появление бикарбоната натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ) и хлорида аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). Из-за того, что бикарбонат натрия слабо растворяется в воде, при рабочей температуре происходит образование осадка и возникновение взвеси. Взвесь фильтруется на барабанном фильтре, осадок на нём промывается водой. Фильтрат отводится для регенерации аммиака. Осадок ведётся в вращающуюся печь прокаливания, где бикарбонат термически термически разлагается на соду, диоксид углерода и водяной пар. Исходящие газы возвращаются в начало процесса и сода выводится как продукт. Рассчитайте токи отдельных компонентов.

### 2. Балансная схема:

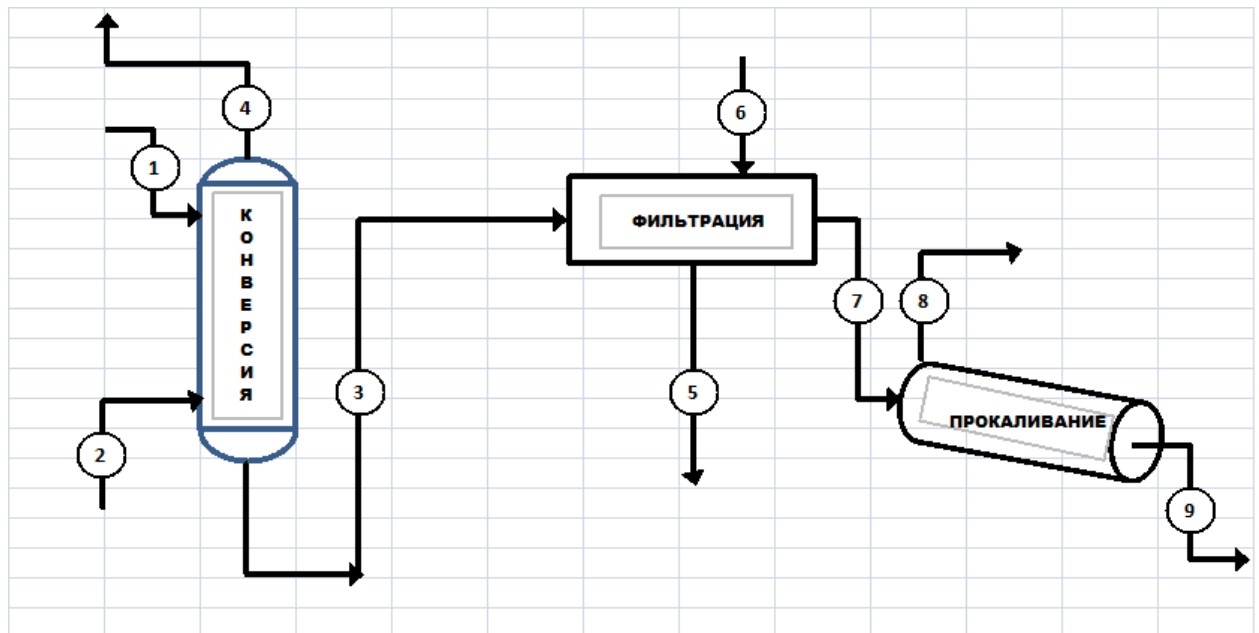


Рисунок 1





### 3. Технологические параметры:

Количество производимой соды		20	т/день
Температура входящего насыщенного раствора соли		25	°C
Избыток диоксида углерода во входящем токе газа		50	% объёмных
Остаточное содержание аммиака в газах, исходящих из колонны		0,5	% объёмных
Содержание воды в отфильтрованном осадке		30	% массовых
Конверсия соли в бикарбонат натрия		0,98	
Количество промывающей воды (n-кратное содержанию воды)		1	
Содержание соли в насыщенном растворе		0,36	кг/1кг воды
Содержание бикарбоната натрия в насыщенном растворе		0,107	кг/1кг воды

Таблица 1

### 4. Список токов, компонентов и технологических единиц:

Список токов и их компонентов	
1	насыщенный раствор соли (NaCl+H <sub>2</sub> O)
2	входящий газ (NH <sub>3</sub> +CO <sub>2</sub> )
3	взвесь (NaCl, H <sub>2</sub> O, NaHCO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> Cl)
4	исходящие газы (CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> )
5	фильтрат (NaCl, H <sub>2</sub> O, NaHCO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> Cl)
6	вода (H <sub>2</sub> O)
7	фильтрационный осадок (NaHCO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O)
8	газ из печи (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)
9	soda (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )

Таблица 2

Список элементов (включая молярную массу)		
1	NaCl	58,44 кг/кмоль соль
2	H <sub>2</sub> O	18,02 кг/кмоль вода
3	Co <sub>2</sub>	44,01 кг/кмоль диоксид углерода
4	NH <sub>3</sub>	17,03 кг/кмоль аммиак
5	NaHCO <sub>3</sub>	84,01 кг/кмоль бикарбонат
6	NH <sub>4</sub> Cl	53,49 кг/кмоль хлорид аммония
7	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106,00 кг/кмоль сода

Таблица 3

Список технологических аппаратов	
1	Колонна
2	Фильтр
3	Печь

Таблица 4

**5. Основы расчёта:**

Балансная величина		масса
Единицы балансной величины		кг/с

Таблица 5

**6. Эталонный ток:**

$m_{1:1} = 20$ тонн NaCl/день = 833 кг/ч = 0,2315 кг/с
--

Таблица 6

**7. Дополнительные вычисления и перерасчёты: концентрация элементов в токах (кг/∑ кг):**

ток	элемент	кг/с	кмоль/с	концентрация	
1	1	0,36	0,0062	0,2647	кг/∑ кг
1	2	1	0,0555	0,7353	кг/∑ кг
		<b>1,36</b>	<b>0,0617</b>	<b>1</b>	кг/∑ кг

Таблица 7

Концентрация элемента 1 в токе 1:

Из задания мы знаем, что концентрация NaCl в поступающем насыщенном растворе составляет 0,36 кг на 1 кг воды. Значит, молярный ток компонента:

$$n_{1:1} = \frac{m_{1:1}}{M_{NaCl}} = \frac{0,36}{58,44} = 0,0062 \text{ кмоль/с} \quad (1)$$

И, соответственно, концентрация NaCl в поступающем растворе рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{m_{1:1}}{m_{1:1} + m_{1:2}} = \frac{0,36}{1,36} = 0,2647 \quad (2)$$



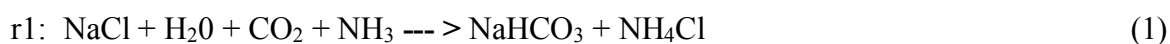
Аналогично рассчитаем концентрацию воды в растворе и концентрации в остальных токах.

Сумма всех концентраций в одном токе всегда равна «1»!

ток	элемент	кг/с	кмоль/с	концентрация	
2	3	6601,5	150	0,7949	кг/Σ кг
2	4	1703	100	0,2051	кг/Σ кг
		<b>8304,5</b>	<b>250</b>	<b>1</b>	кг/Σ кг
ток	элемент	кг/с	кмоль/с	концентрация	
4	3	4378,995	99,5	0,9981	кг/Σ кг
4	4	8,515	0,5	0,0019	кг/Σ кг
		<b>4387,510</b>	<b>100,0</b>	<b>1</b>	кг/Σ кг
ток	элемент	кг/с	кмоль/с	концентрация	
7	5	70	0,8332	0,7	кг/Σ кг
7	2	30	0,5609	0,3	кг/Σ кг
		<b>100</b>	<b>1,3941</b>	<b>1</b>	кг/Σ кг

Таблица 8

### 8. Независимые химические реакции:



стехиометрические коэффициенты:

	Элемент	масса	моли		килограммы	
			r1	r2	r1	r2
1	NaCl	58,44	-1	0	-58,44	0
2	H2O	18,02	-1	1	-18,02	18,02
3	Co2	44,01	-1	1	-44,01	44,01
4	NH3	17,03	-1	0	-17,03	0
5	NaHCO3	84,01	1	-2	84,01	-168,02
6	NH4Cl	53,49	1	0	53,49	0
7	Na2CO3	106,00	0	1	0	106

Таблица 9

**9. Матрица инцидентности (МИ):**

технологический аппарат	ток									реакция	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	r1	r2
1	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	-1	1	-1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	1

Таблица 10

**10. Таблица данных (ТД):**

элемент	ток									реакция	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	r1	r2
1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	-58	0
2	1	0	1	0	1	1	1	1	0	-18	18
3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	-44	44
4	0	1	0	1	0	0	0	0	0	-17	0
5	0	0	1	0	1	0	1	0	0	84	-168
6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	53	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	106

Таблица 11

**11. Количество неизвестных параметров (nX):**

nX	22
----	----

Таблица 12

**12. Матрица балансных уравнений (МБУ):**

Элемент	Технологический аппарат		
	1	2	3
1	2	2	0
2	2	4	2
3	2	0	1
4	2	0	0
5	1	3	1
6	1	2	0
7	0	0	1

Таблица 13

**13. Количество балансных уравнений (nУ):**

nУ	14
----	----

Таблица 14

**14. Количество дополнительных условий (ДУ):**

ДУ	8
----	---

Таблица 15

**15. Формулировка дополнительных условий:**

Эталонный поток		
ток	элемент	ток
1	1	0,23 кг/с

Таблица 16



Концентрация элементов		
ток	элемент	концентрация
1	1	0,26471
2	3	0,79493
4	3	0,00194
7	2	0,3

Таблица 17

Сотношение между токами элементов				
ток	элемент	соотношение	ток	элемент
5	5	0,107	5	2
6	2	1	7	2
3	1	0,02	1	1

Таблица 18

16. Матрица коэффициентов (A) и вектор свободных членов (B):

ток	технологический аппарат	элемент	A																			r 1	r 2	B		
			1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5	5	5	6	6	7	7	8				8	9
элемент	A		m1;1	m1;2	m2;3	m2;4	m3;1	m3;2	m3;5	m3;6	m4;3	m4;4	m5;1	m5;2	m5;5	m5;6	m6;2	m7;2	m7;5	m8;1	m8;3	m9;7				
ток элемента	1	1	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-58,44	0	0
	1	2	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18,02	0	0
	1	3	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-44,01	0	0
	1	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,03	0	0
	1	5	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84,01	0	0
	1	6	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53,49	0	0
	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
	2	6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	18	0
	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	44	0	0
	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-168	0	0
	3	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	106	0	0
	эталонный ток		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,231
	концентрация тока 1		0,26	-0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	концентрация тока 2		0	0	-0,2	0,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	концентрация тока 2		0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	-0,998	0	0	0	0	0	0	0	-0,7	0,3	0	0	0	0	0
	соотношения токов		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,11	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	элемент 2 в токах 6 и 7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
	конверсия NaCl		0	0	0	0	1	-0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 19

17. Проверка решаемости матрицы коэффициентов (A):

определитель	-1020,3
--------------	---------

Таблица 20

**18. Вектор неизвестных (X):**

m1;1	0,23148	кг/с
m1;2	0,08333	кг/с
m2;3	0,26188	кг/с
m2;4	0,06756	кг/с
m3;1	0,00024	кг/с
m3;2	0,01203	кг/с
m3;5	0,33242	кг/с
m3;6	0,21165	кг/с
m4;3	0,08773	кг/с
m4;4	0,00017	кг/с
m5;1	0,00024	кг/с
m5;2	0,01203	кг/с
m5;5	0,00129	кг/с
m5;6	0,21165	кг/с
m6;2	0,14191	кг/с
m7;2	0,14191	кг/с
m7;5	0,33113	кг/с
m8;1	0,17743	кг/с
m8;3	0,08673	кг/с
m9;7	0,2089	кг/с

*Таблица 21*



## Железо

### 1. Задание:

Железо производится следующим образом: при высокой температуре производится восстановлением оксида  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  водородом  $\text{H}_2$  до металлического железа. Свежее распыление, которое, кроме водорода, содержит определенное молярное количество диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , смешивается с рециркулированным водородом перед подачей в реактор. Соотношение количества рециркулированного водорода ко вновь поступившему зафиксирован в технологическом регламенте. После того, как поток выходит из реактора, из него удаляется вода, а потом устраняется определенное количество газа, чтобы в системе не копился диоксид углерода  $\text{CO}_2$ . Устранение происходит так, чтобы концентрация  $\text{CO}_2$  на входе не превысило величину, зафиксированную в технологическом регламенте.

### 2. Балансная схема:

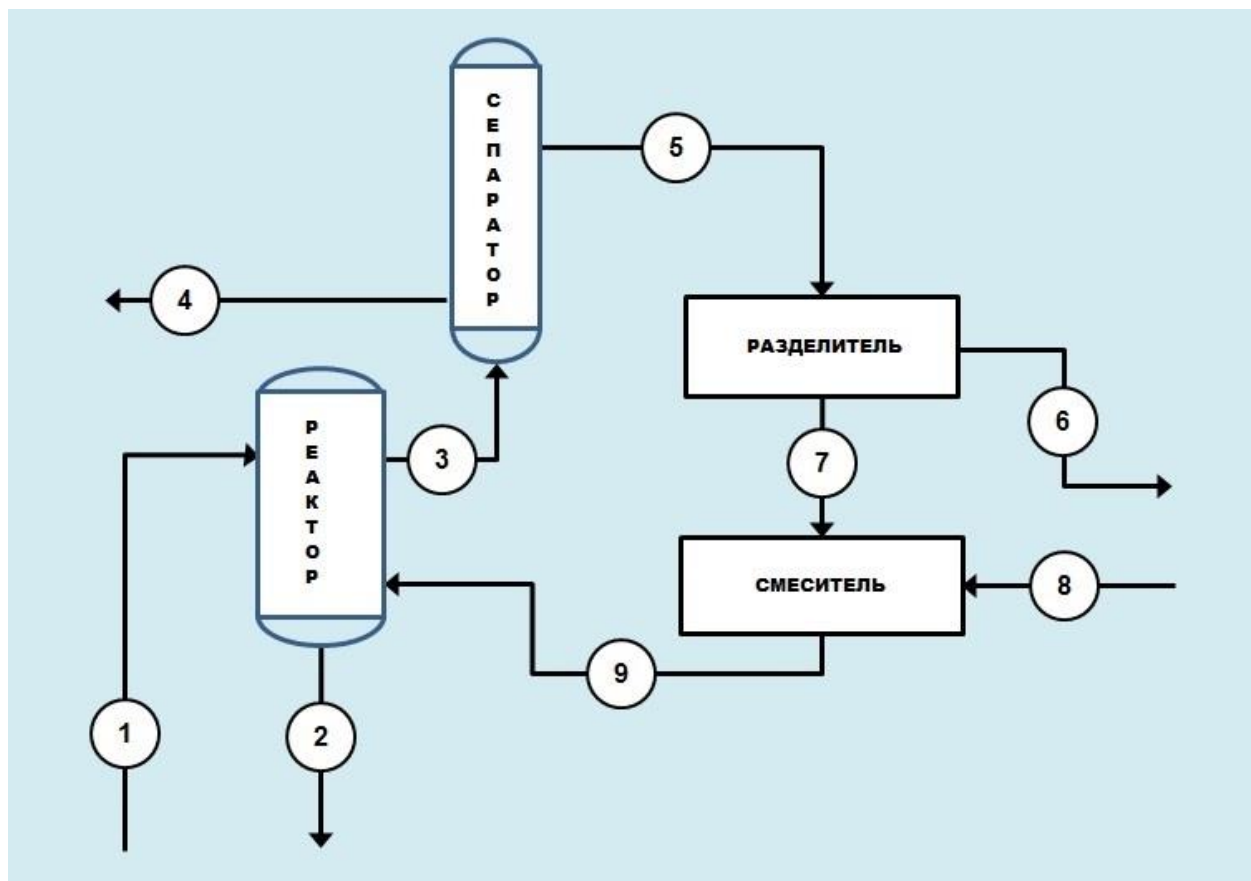


Рисунок 1





### 3. Технологические параметры:

Производимое железо			50	кг/смена
Содержание CO <sub>2</sub> в свежем потоке			1	% объема
Содержание CO <sub>2</sub> на входе в реактор			2,5	% объема
Соотношение между рециркулируемым водородом и свежим			4 к 1	

Таблица 1

### 4. Список токов, компонентов и технологических единиц:

Список токов и их компонентов		
1 сырье		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2 продукт		Fe
3 выходящий газ		H <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> O
4 водяной пар		H <sub>2</sub> O
5 сухой газ		H <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub>
6 выхлопной газ		H <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub>
7 рециркулируемый газ		H <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub>
8 подаваемый газ		H <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub>
9 технологический газ		H <sub>2</sub> ,CO <sub>2</sub>

Таблица 2

Список технологических аппаратов		
1 реактор		
2 сепаратор		
3 разделитель		
4 смеситель		

Таблица 3

Список элементов		
1 H <sub>2</sub>	2,02	кг/кмоль
2 CO <sub>2</sub>	44,01	кг/кмоль
3 H <sub>2</sub> O	18,02	кг/кмоль
4 Fe	55,85	кг/кмоль
5 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159,70	кг/кмоль

Таблица 4

**5. Основы расчёта:**

Балансная величина		количество вещества
Единицы балансной величины		моль/с

Таблица 5

**6. Эталонный поток:**

	кг/смена	моль/с
m2;4	50	0,0311

Таблица 6

**7. Дополнительные вычисления и перерасчёты - концентрация элементов в токах:**

Концентрация элементов		
ток	элемент	концентрация
8	1	0,99
8	2	0,01
		1
ток	элемент	концентрация
9	1	0,975
9	2	0,025
		1

Таблица 7

Соотношение между токами элементов				
ток	элемент		ток	элемент
7	1	4	8	1

Таблица 8

**8. Независимые химические реакции:**

стехиометрические коэффициенты



		моли	граммы	
элемент	масса	r1	r1	
1	H2	2,02	-3	-6,06
2	CO2	44,01	0	0
3	H2O	18,02	3	54,06
4	Fe	55,85	2	111,7
5	Fe2O3	159,70	-1	-159,7

Таблица 9

**9. Матрица инцидентности (МИ):**

технологический аппарат	ТОК									реакция
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	r1
1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0

Таблица 10

**10. Таблица данных (ТД):**

элемент	ТОК									реакция
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	r1
1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	-3
2	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Таблица 11

**11. Количество неизвестных параметров (nX):**

nX	17
----	----

Таблица 12

**12. Матрица балансных уравнений (МБУ):**

элемент	технологический аппарат			
	1	2	3	4
1	2	2	3	3
2	2	2	3	3
3	1	2	0	0
4	1	0	0	0
5	1	0	0	0

Таблица 13

**13. Количество балансных уравнений (nY):**

nY	12
----	----

Таблица 14

**14. Количество требуемых дополнительных условий:**

дУ	5
----	---

Таблица 15

**15. Формулировка дополнительных условий:**

Эталонный поток		
ток	элемент	ток
1	1	0,031

Таблица 16

Концентрация элементов		
ток	элемент	концентрация
8	2	0,01
9	2	0,025

Таблица 17



Соотношение между токами элементов				
ток	элемент	соотношение	ток	элемент
7	1	4	8	1

Таблица 18

**16. Матрица коэффициентов (A) и матрица свободных членов (B):**

поток элемент ток элемента	технологический аппарат	элемент																		B		
			1	2	3	3	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9				
	A		1;5	2;4	3;1	3;2	3;3	4;3	5;1	5;2	6;1	6;2	7;1	7;2	8;1	8;2	9;1	9;2	r1			
1		1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-3	0	0
1		2	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1		3	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
1		4	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
1		5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
2		1	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		2	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		3	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		1	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
4		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	-1	0	0	0	0
4		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-1	0	0	0	0
		эталонный ток		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03
		концентрация тока 8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
		концентрация тока 9		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
	соотношение токов		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	4	0	0	0	0	0	0	
	дополнительное условие		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	

Таблица 19

В данном примере нам необходимо учесть, что мы имеем дело с нелинейными уравнениями (так как мы учитываем соотношение между разными токами одного элемента). Поэтому, здесь двойной столбца свободных членов, то есть матрица.

**17. Проверка решаемости матрицы коэффициентов (A):**

мопред	-9,6525
--------	---------

Таблица 20

**18. Вектор неизвестных (X):**

Так как в данном случае мы имеем дело с системой нелинейных уравнений, то в результате мы получим матрицу (так как мы умножаем матрицу A на матрицу свободных членов B).

a	0	0	1	0	0	0	1	0,0256	0,2	0	0,8	0,0236	0,2	0,00202	1	0,0256	0
b	0,02	0	0	0	0	0,05	0	0,0012	-0,04	0	0,0373	0,0011	0,009326	0,000094	0,047	0,0012	0,01554

Таблица 21 (в данной таблице осуществлено округление чисел)



То есть, мы получаем матрицу с коэффициентами  $a$  и  $b$ , а токи элементов будут рассчитываться по формуле:

$$n = a \cdot P + b \quad (2)$$

Где параметр  $P$  мы определим из расчёта, что разница концентраций H<sub>2</sub> в потоках 5 и 6 будет минимальна

Для этого в Microsoft Excel создадим вектор неизвестных, используя формулу (2), параметр  $P$  запишем в отдельную ячейку, напишем формулу:

$$\frac{n_{5;1}}{n_{5;1} + n_{5;2}} - \frac{n_{6;1}}{n_{6;1} + n_{6;2}} \quad (3)$$

И воспользуемся специальной надстройкой SOLVER. В качестве переменной зададим параметр  $P$  при условии, что формула (3) будет 0.

Получим следующий ответ:

P	0,307744
---	----------

Таблица 22

То есть, при вычисленном и подставленном параметре  $P$  мы приходим к финальному решению и результатам в [моль/с]:

элемент		Ток								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	H <sub>2</sub>	0	0	0,009	0	0,308	0,024	0,283	0,071	0,354
2	CO <sub>2</sub>	0	0	0,047	0	0,009	0,001	0,008	0,001	0,009
3	H <sub>2</sub> O	0	0	0,308	0,047	0	0	0	0	0
4	Fe	0	0,031	0	0	0	0	0	0	0
5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,016	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 23



## Котёл

### 1. Задание:

Газовый котёл используется в семейном коттедже в качестве источника тепла. В котле сгорает метан, вследствие этого выделяется определённое количество тепловой энергии. При горении метана происходит следующая стехиометрическая реакция:  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ . Сухой воздух поступает в избытке, соответствующем требованием стехиометрии. Горение не идеально и, поэтому, в выхлопных газах находятся следы несгоревшего газа.

### 2. Балансная схема:

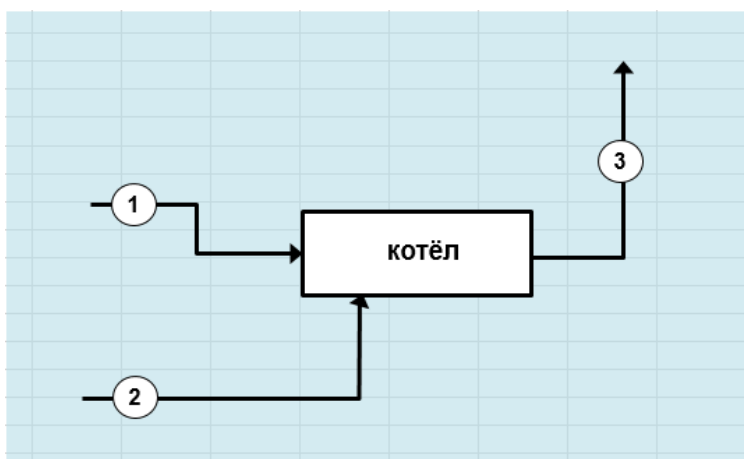


Рисунок 1

### 3. Технологические параметры:

Универсальная газовая константа	R =	8,314	кДж·кмоль <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
Пересчёт °C на K	0 °C =	273,15	K
Требуемая мощность	Q =	20	кВт
Концентрация CH <sub>4</sub> в выхлопных газах		0,004	кмоль/Σкмоль
Концентрация O <sub>2</sub> в воздухе		0,21	кмоль/Σкмоль
Избыток воздуха		25	%
Температура метана		5	°C
Температура воздуха		-15	°C
Температура выхлопных газов		150	°C

Таблица 1

**4. Список токов, компонентов и технологических единиц:**

Список токов		Список элементов			Список технологических единиц		
1	Топливо	1	CH <sub>4</sub>	16,04	кг/кмоль	1	Котёл
2	Воздух	2	O <sub>2</sub>	32,00	кг/кмоль		
3	Выхлопные газы	3	N <sub>2</sub>	28,01	кг/кмоль		
		4	CO <sub>2</sub>	44,01	кг/кмоль		
		5	H <sub>2</sub> O	18,02	кг/кмоль		

Таблица 2

**5. Основы расчёта:**

Балансная величина	молярный ток
Единица балансной величины	кмоль/с

Таблица 3

**6. Эталонная величина**

Q	20	кВт
---	----	-----

Таблица 4

**7. Дополнительные вычисления и перерасчёты:**

Концентрация элементов		
ток	элемент	концентрация
2	2	0,210
2	3	0,790
		1
ток	элемент	концентрация
3	1	0,004

Таблица 5

Соотношение между токами элементов (избыток воздуха)				
ток	элемент		ток	элемент
2	2	2,5	1	1

Таблица 6



**8. Независимые химические реакции:**

стехиометрические коэффициенты:

	элемент	моли	кг	индекс
1	CH4	-1	-16,04	63
2	O2	-2	-64	34
3	N2	0	0	31
4	CO2	1	44,01	48
5	H2O	2	36,04	22

Таблица 7 (индекс элемента соответствует его положению в таблице TERMODATA.xls)

**9. Матрица инцидентности (МИ):**

технологическая единица	ток			реакция
	1	2	3	r1
1	1	1	-1	1

Таблица 8

**10. Таблица данных (ТД):**

элемент	ток			реакция
	1	2	3	r1
1	1	0	1	-1
2	0	1	1	-2
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1
5	0	0	1	2

Таблица 9

**11. Количество неизвестных параметров (nX):**

nX	9
----	---

Таблица 10

**12. Матрица количества балансных уравнений (МБУ):**

	Технологическая единица
элемент	1
1	2
2	2
3	2
4	1
5	1

Таблица 11

**13. Количество балансных уравнений (nY):**

nY	5
----	---

Таблица 12

**14. Количество требуемых дополнительных условий:**

ду	4
----	---

Таблица 13

**15. Формулировка дополнительных условий:**

Эталонная величина		
Q	20	кВт

Таблица 14

Концентрация элементов			
ток	элемент	концентрация	
2	2	0,210	кмоль/∑кмоль
2	3	0,790	кмоль/∑кмоль
		1	кмоль/∑кмоль
ток	элемент	концентрация	
3	1	0,004	кмоль/∑кмоль

Таблица 15



Соотношение между токами элементов (избыток воздуха)				
ток	элемент		ток	элемент
2	2	2,5	1	1

Таблица 16

Следующим дополнительным условием является энтальпический баланс, который требует калькуляцию индивидуальную энтальпию компонентов в кВт. В этой задаче был использован макрос, написанный проф. Дитлем специально для импорта данных из таблицы TERMODATA.xls.

индекс	элемент	ток			реакция
		1	2	3	r1
63	1	-0,699888927	0	4,884534	74,90181
34	2	0	-1,16910606	3,735451	0
31	3	0	-1,16802435	3,651651	0
48	4	0	0	4,968694	-393,769
22	5	0	0	4,26865	-483,994
Teplota	°C	5	-15	150	
					<b>-802,861</b>

Таблица 17

**16. Матрица коэффициентов (A) и матрица свободных членов (B):**

ток	технологический аппарат	элемент	A										r1	B	
			1	2	2	3	3	3	3	3	3	3			
элемент			1	2	3	1	2	3	4	5					
ток элемента			n1,1	n2,2	n2,3	n3,1	n3,2	n3,3	n3,4	n3,5					
	1	1	1	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0			
	1	2	0	1	0	0	-1	0	0	0	-2	0			
	1	3	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0			
	1	4	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0			
	1	5	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	0			
	Энтальпический баланс		-0,69988893	-1,16911	-1,16802	-4,88453	-3,73545	-3,65165	-4,96869	-4,26865	802,861	20			
	Концентрация O <sub>2</sub> в воздухе		0	-0,79	0,21	0	0	0	0	0	0	0			
	Концентрация CH <sub>4</sub> в выхлопных газах		0	0	0	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0			
	Избыток воздуха		-2,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0			

Таблица 18

**17. Проверка решаемости матрицы коэффициентов (A):**

мопред	146,402
--------	---------

Таблица 19



**18. Вектор неизвестных (X):**

n1,1	0,0287	кмоль/с
n2,2	0,0717	кмоль/с
n2,3	0,2698	кмоль/с
n3,1	0,0015	кмоль/с
n3,2	0,0173	кмоль/с
n3,3	0,2698	кмоль/с
n3,4	0,0272	кмоль/с
n3,5	0,0544	кмоль/с

*Таблица 20*

***Источник:***

*Programování pomocí počítače – cvičební úlohy (prof. Ing. Pavel DITL, DrSc)*