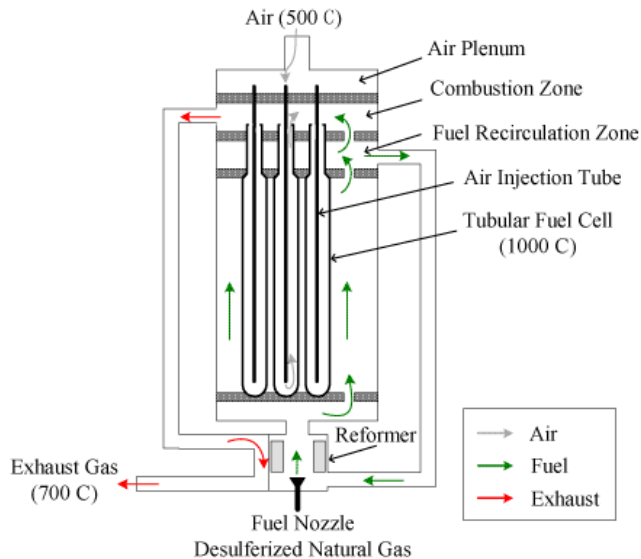
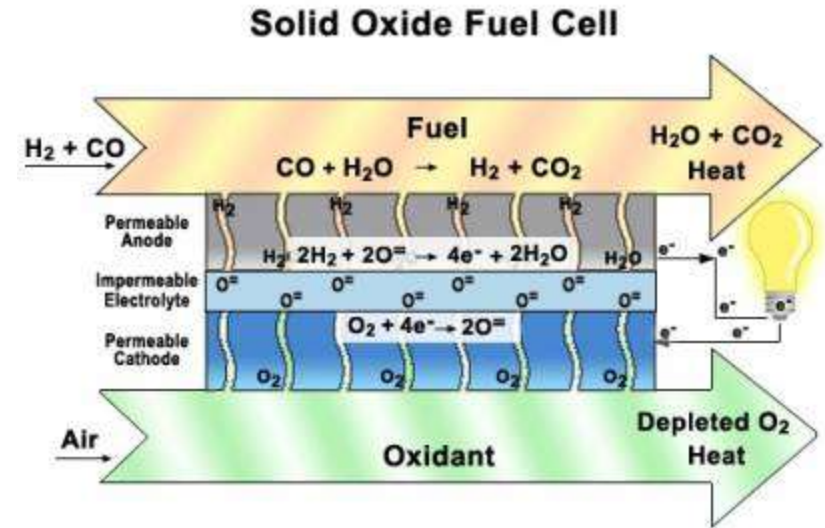
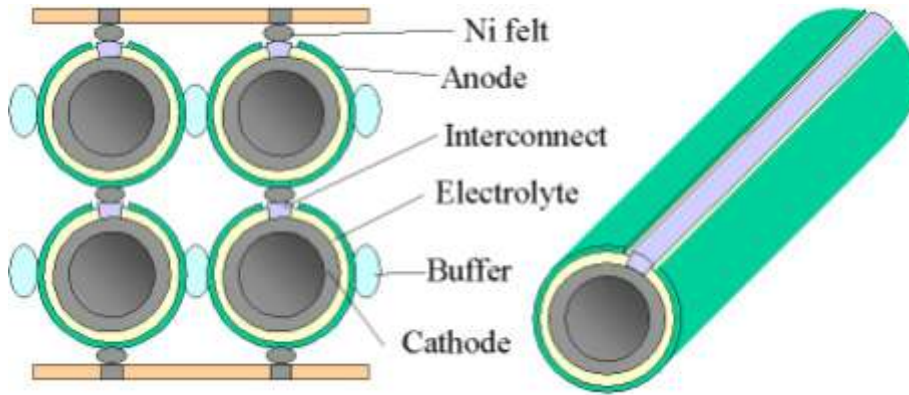


# Tubular SOFC as example

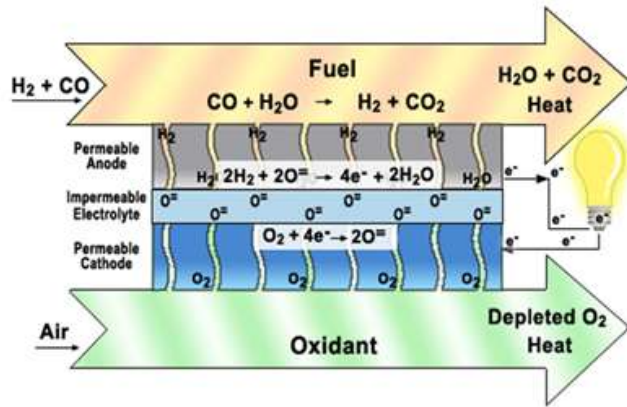


Flow schematic of the 25kW SOFC generator module

- <http://www.csa.com/discoveryguides/fuecel/overview.php>
- <http://www.energy.siemens.com/entry/energy/hq/en/?tab=energy-1213565-Power%20Generation>
- <http://www.aki.che.tohoku.ac.jp/~koyama/html/research/SOFC.html>
- [http://www.nfcruc.uci.edu/2/Activities/ResearchSummaries/SolidOxide/Integrated Fuel Cell Systems/Index.aspx](http://www.nfcruc.uci.edu/2/Activities/ResearchSummaries/SolidOxide/Integrated%20Fuel%20Cell%20Systems/Index.aspx)
- etc

В качестве примера выбрана хорошо и подробно описанная система Tubular SOFC (tubular solid-oxide fuel cell).

# Component model



$e^-$

Oxygen

Nitrogen

Methane

Heat

$O^{2-}$

Hydrogen

Vapor

Carbon oxide

Carbon dioxide

Air pump

Fuel pump

Fuel delivery pipe

Air delivery pipe

Combustion chamber

Assemble

Interconnector

Glue

Porous holder

Anode

Electrolyte

Cathode

Contact mesh

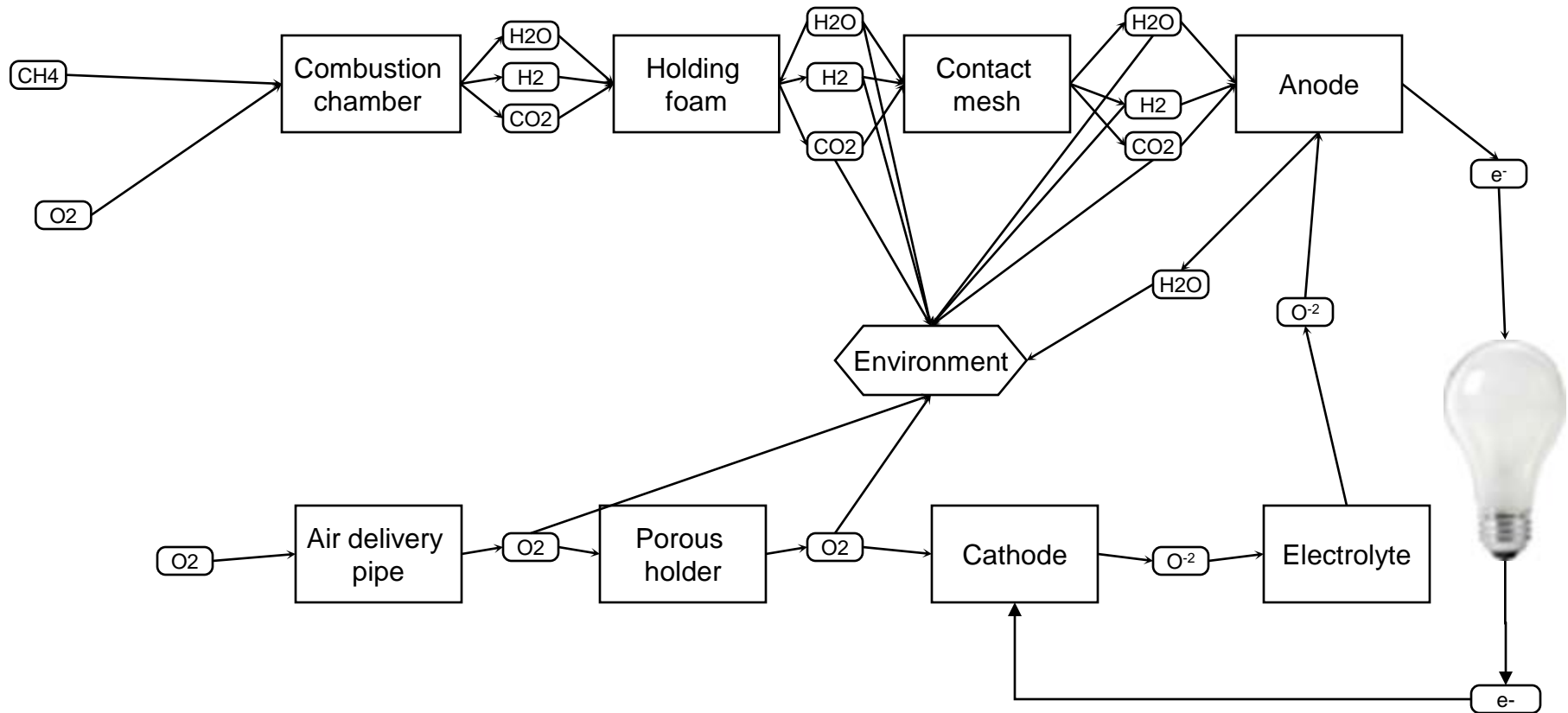
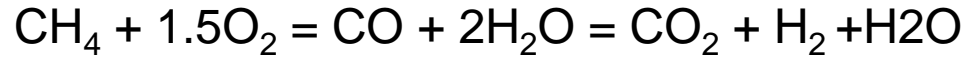
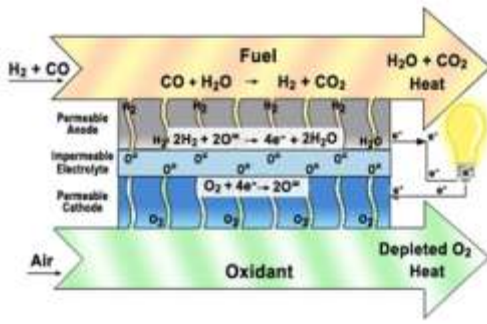
Holding foam

ПМ есть частный случай ФМ, в которой часть компонентов – потоки.

Поэтому многие шаги методики похожи.

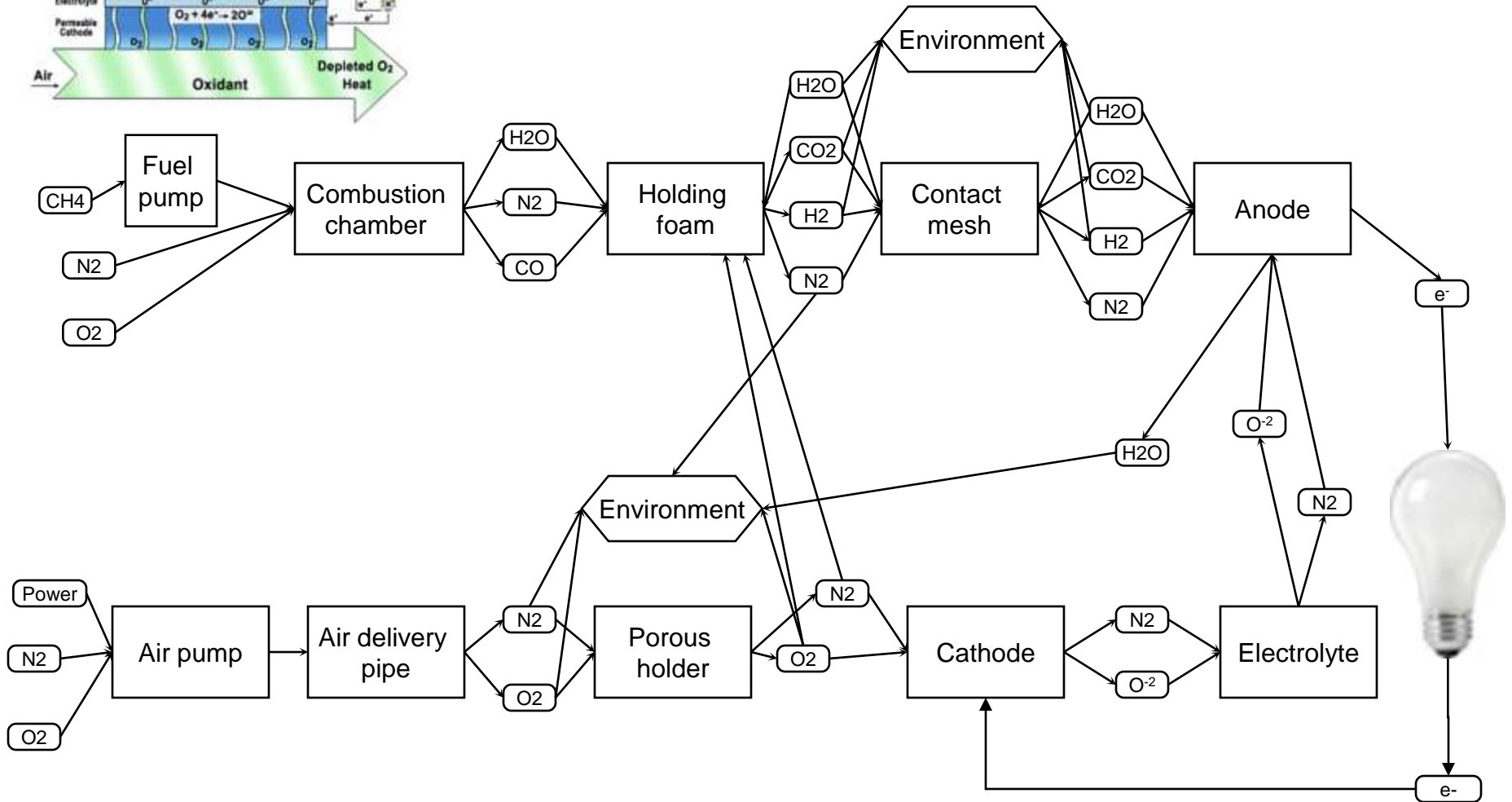
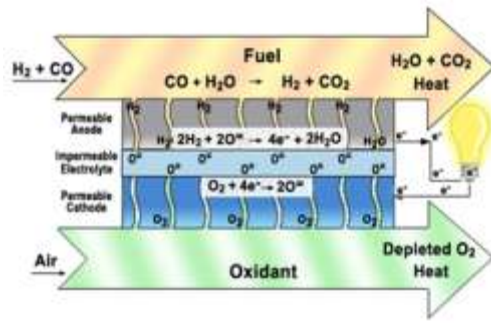
Шаг 1 – компонентная модель

# Flow model



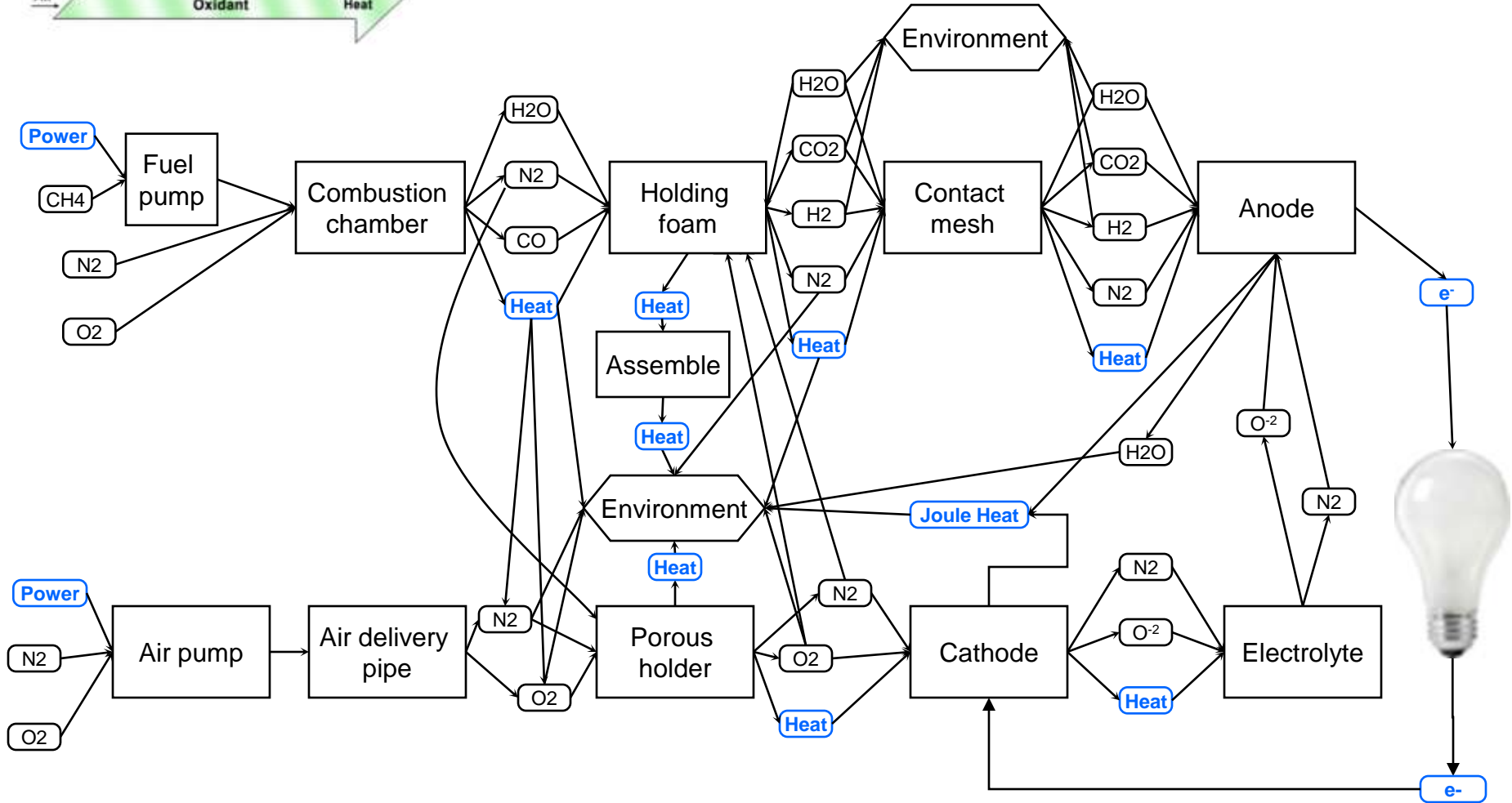
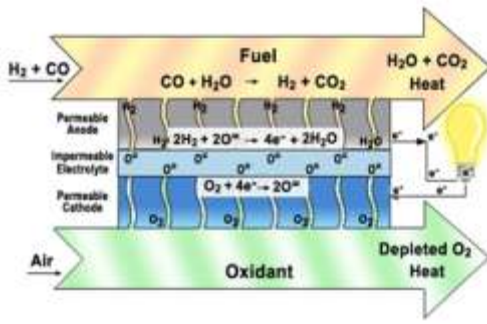
Шаг 2. Составить модель для главных потоков (тех, которые predeterminedены принципом действия) Модель составлять в формате «Компонент – поток – компонент». Процедура: посмотреть и записать все потоки, исходящие от каждого из компонентов.

# Flow model



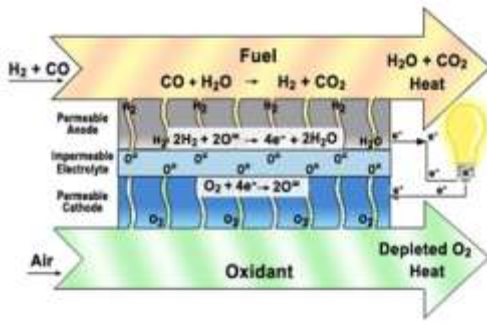
Шаг 2 (продолжение). Добавить все остальные материальные потоки

# Flow model

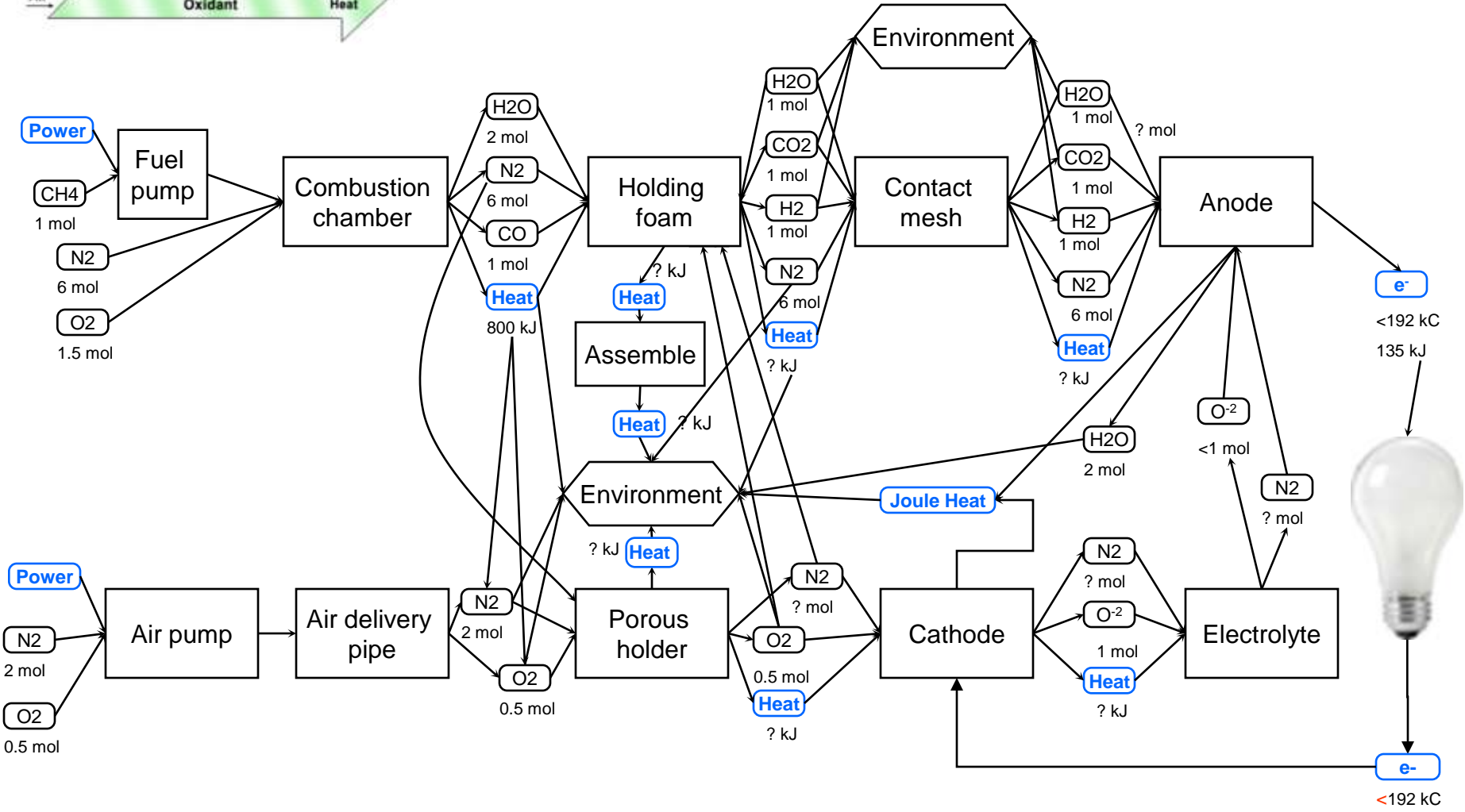


Шаг 3. Добавить энергетические потоки.

Примечание: Шаг 4 «Добавить паразитные потоки» пропущен ввиду их незначительности.



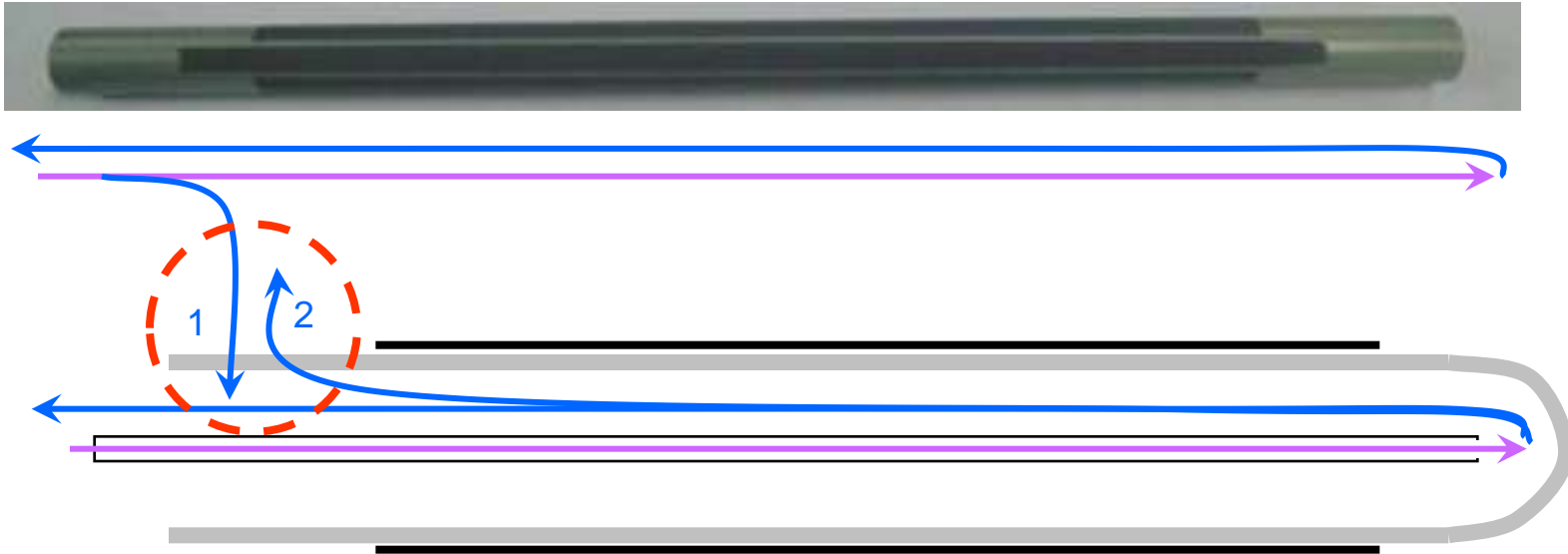
# Flow model



Шаг.5. Проставить значения параметров каждого из потоков. В данном примере это количество (на 1 моль метана)  
 Ввиду проведения численного анализа метка «адекватно/неадекватно» не проставлена



# Nitrogen flow



Some of flows can interact each to other. In this case we need to analyze them with more details. For example:

One can see 2 nitrogen flows through the porous holder. Which one is real?

Be sure, the #1 is (air pressure inside porous tube is  $\sim 1$  Atm while outside air pressure is  $\sim 3$  Atm).

So, we need to correct the model

Шаг 7. В силу формальности процедуры шагов 2-4 в модели могут оказаться потоки, реально не текущие. Убрать их из модели





# Flow model (table)

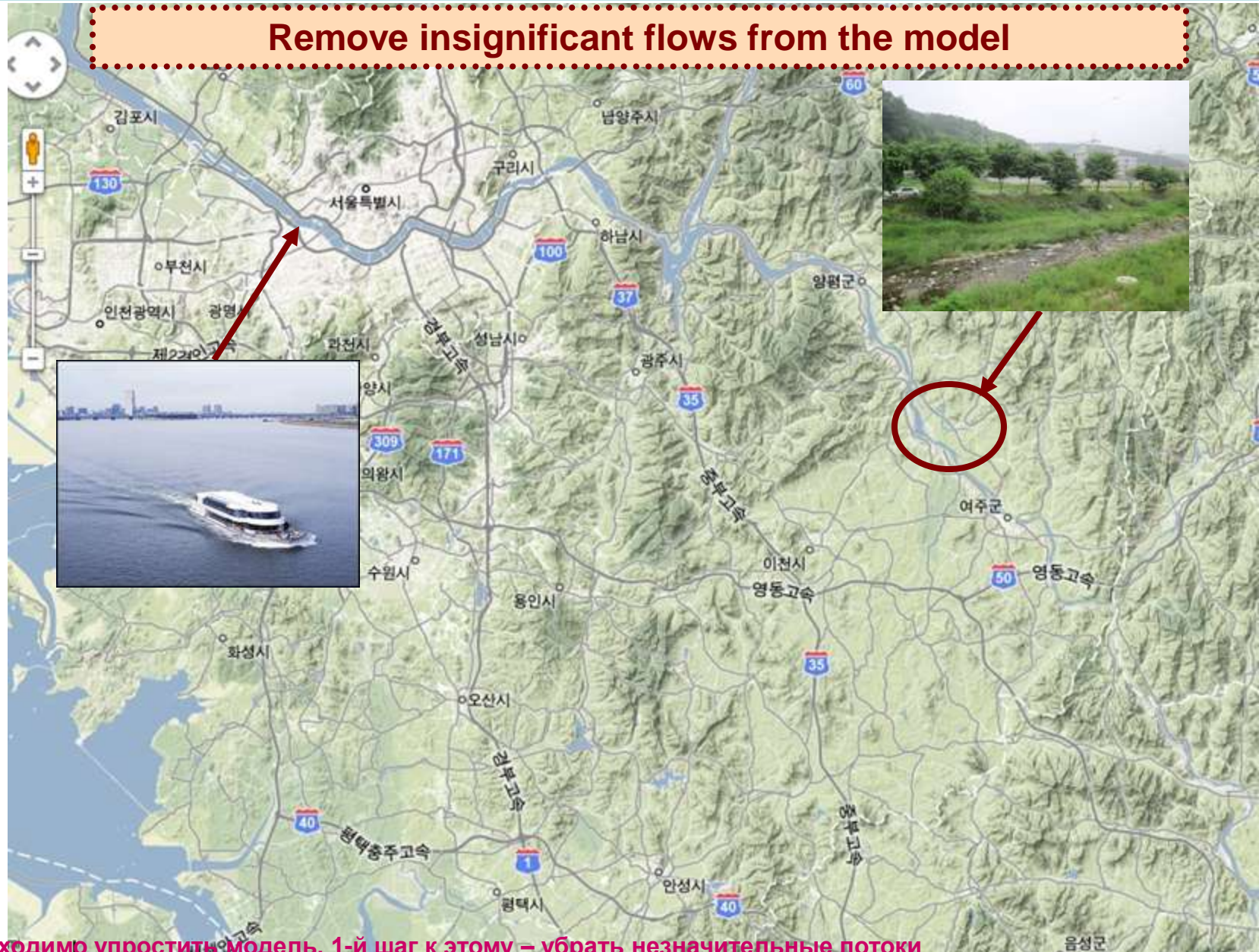
Flow	Source	Object	Value	
Power	Grid	Fuel pump	?	
CH4	Delivery system		1 mol	
N2	Compressor	Combustion Chamber	6 mol	
O2			1.5 mol	
H2O	Combustion Chamber	Holding foam	2 mol	
N2			6 mol	
CO			1 mol	
Heat		Environment	800 kJ	800 kJ
Heat				
Heat				
Heat				
N2		Holding foam	Porous holder	?
Heat			Assemble	?
H2O			Contact mesh	<1 mol
CO2	<2 mol			
H2	<1 mol			
N2	<6 mol			
Heat	?			
H2O	Environment		<1 mol	
CO2			<2 mol	
H2			<1 mol	
N2		<6 mol		
....	....	....	....	
O2	Porous holder	Holding foam	~0.14 mol	

**Full table consist of 56 flows!**

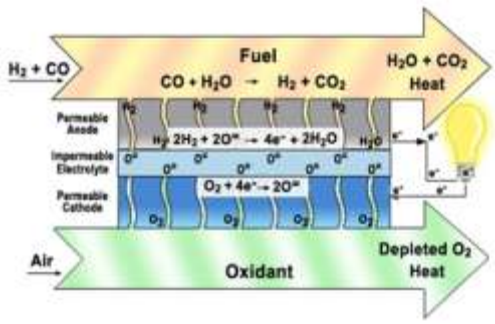
**We strongly need to simplify the model.**

# The 1st way to simplify model

Remove insignificant flows from the model

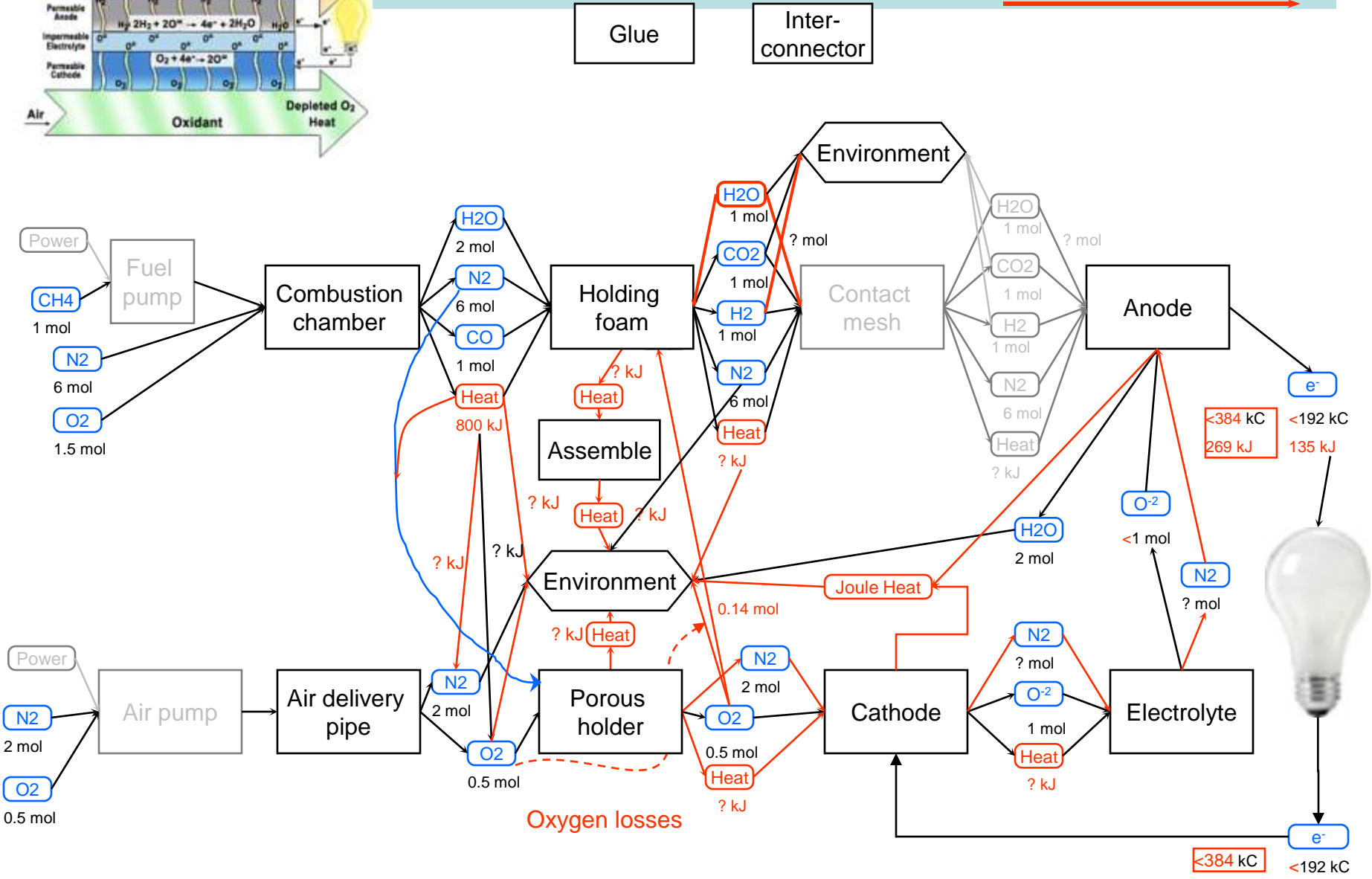


Необходимо упростить модель. 1-й шаг к этому – убрать незначительные потоки



# Flow model

Harmful flows



Шаг 9. Убрать из модели незначительные (несущественные) потоки



# The hazard of the way

In a rain season even a small brook can become a “last drop” and burst a dam



In this case, we've lost the harmful interaction between hot water vapor and metal grid. This interaction causes necessity to use Ag.

**THUS we can go this way but we need to be very accurate and cautious**

Опасность шага 9. Мы не знаем заранее, какой поток важен (иначе не нужен анализ). Поэтому делать это нужно очень осторожно.

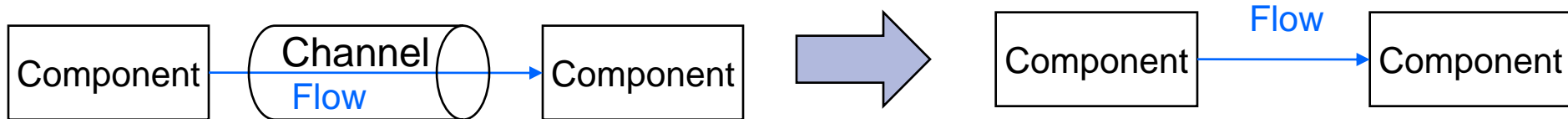
# The 2nd way to simplify model

Primary flow was described in terms **“subject – object”**

The useful way is to describe as **“source – channel – object”**

**“Pump – pipe – pan”**

It is possible due to some components function is to transfer flow



2-й путь упрощения модели: переход к трехзвенному описанию потоков (в принципе, можно сразу описывать потоки в таком формате, но предлагаемый пошаговый путь просто проще)

# Channels characteristics

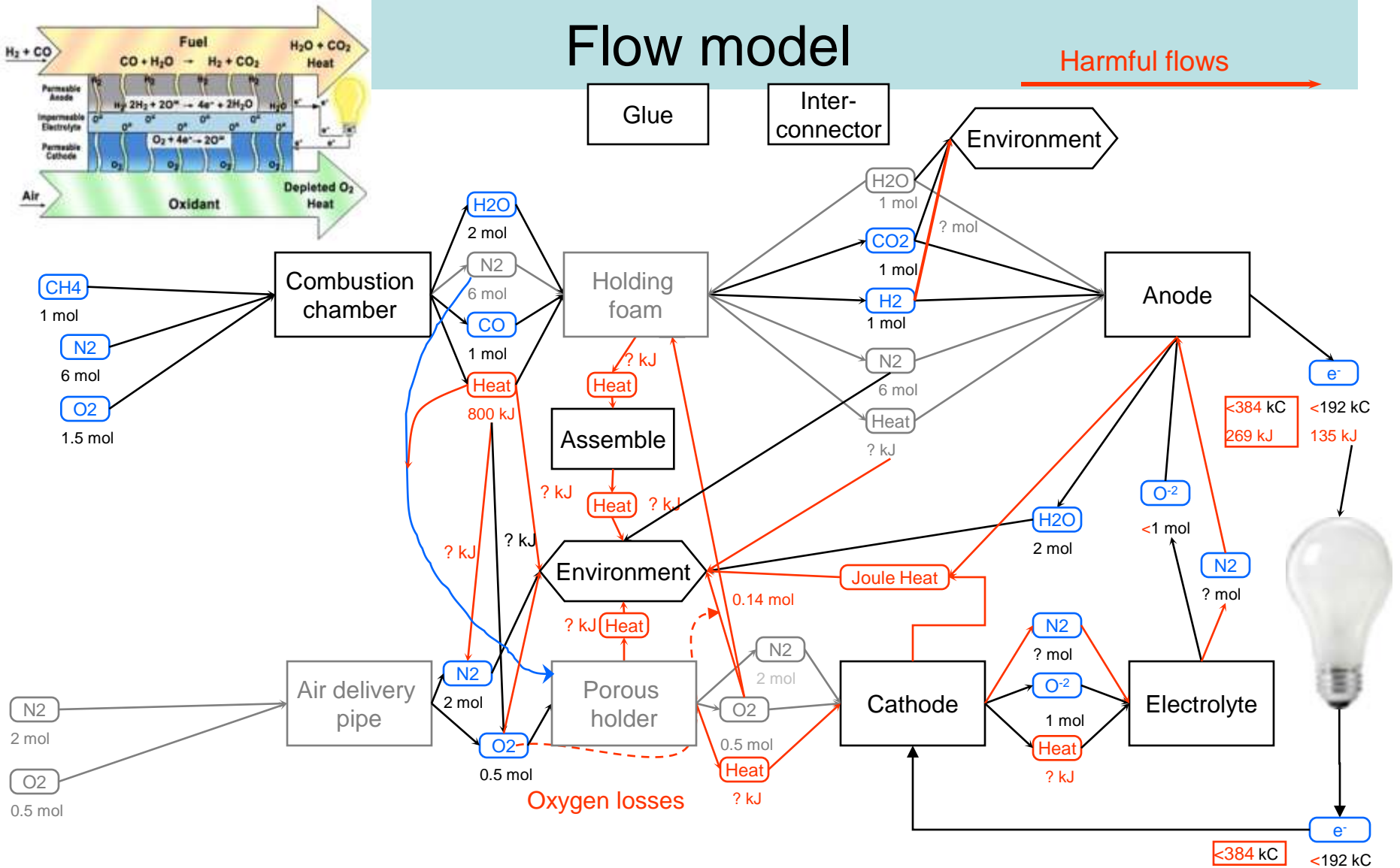
- Conductivity characteristics
  - Bottleneck
  - Stagnant Zone
  - Long flow
  - High channel resistance
  - Low flow density
  - Large number of transformations
- Utilization characteristics
  - Gray Zone
  - Channel damages flow
  - Flow damages channel

Вводя каналы, как отдельные компоненты анализа, мы получаем возможность управлять ими. Здесь показаны основные (типовые) свойства (характеристики) каналов, на которые мы можем сравнительно легко воздействовать.



# Flow model

Harmful flows →

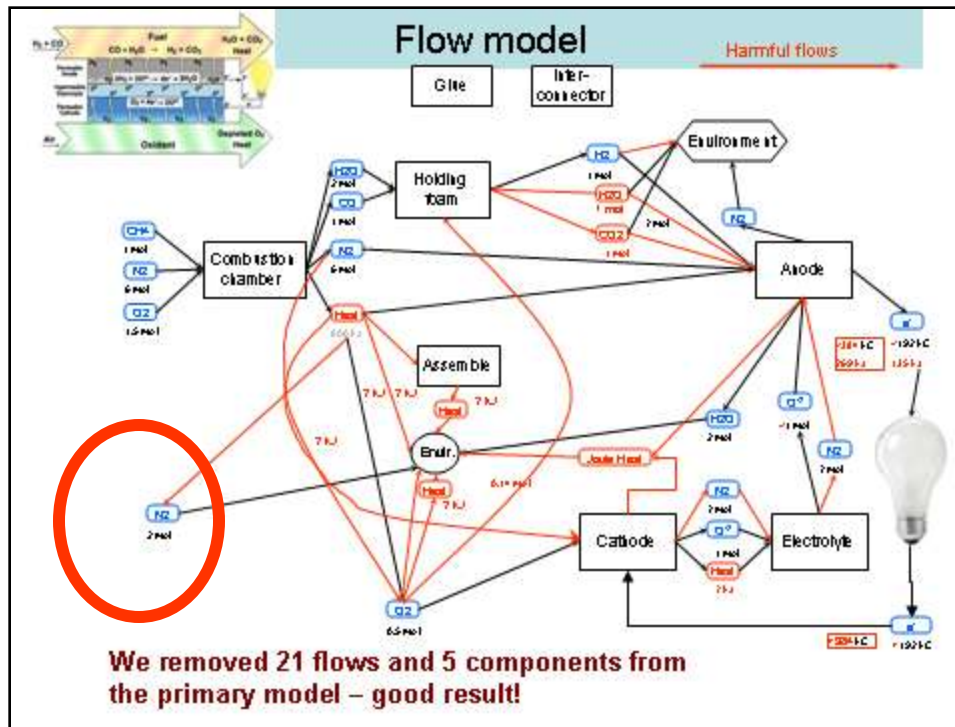
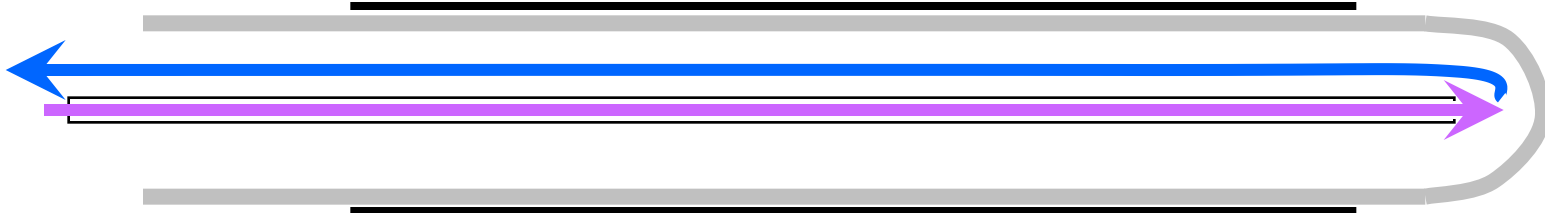


- Air delivery pipe and porous holder is the channel for oxygen, nitrogen and heat.
- Holding foam is the reactor for  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$  reaction but the channel for all other flows

Шаг 10. Выделить каналы (компоненты, сквозь которые поток проходит без изменений или с минимальными изменениями)



# Nitrogen flow

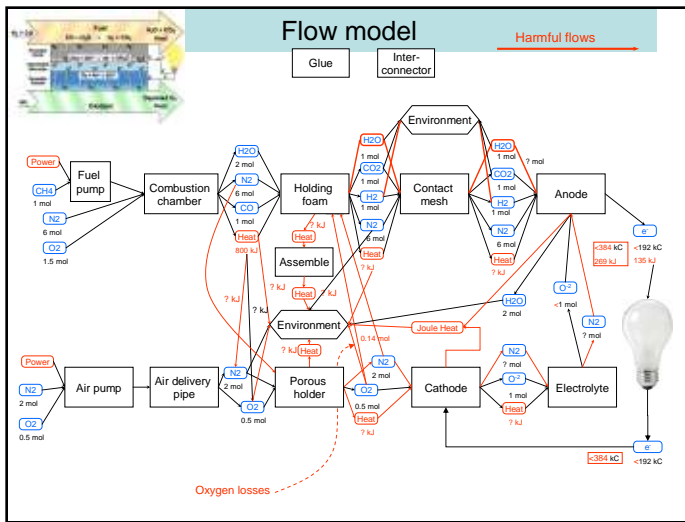


Один из результатов шага 10: проявляются некоторые особенности потоков. Например, поток азота внутри трубки идет из надсистемы в надсистему и единственное, что с ним происходит – он подхватывает и уносит тепло (это хорошо видно на предыдущем слайде)

# Flow model (table)

Flow	Source	Channel	Object	Value
CH4	Supersystem	Pump	Combustion chamber	1 mol
N2		Delivery system		6 mol
O2				1.5 mol
H2O	Combustion chamber	Delivery system	Holding foam	2 mol
CO		Delivery system		1 mol
N2		Delivery system + Holding foam	Anode	5(?) mol
N2		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode	1(?) mol
Heat		Delivery system + Holding foam	Anode	800 kJ
Heat		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode	
Heat			N2	
Heat			O2	
Heat		Environment		
Heat		Delivery system + Holding foam	Assemble	
H2		Holding foam	Holding foam	Anode
H2O	X mol			
CO2	Z mol			
H2	Holding foam + Delivery system		Environment	1-(Y) mol
H2O				1 mol
CO2				1 mol
N2	Anode			
....	....		....	....
O2	Supersystem	Air delivery pipe + Porous holder	Holding foam	~0.14 mol

**Шаг 11. Составить табличную форму модели. Здесь сокращается число строк (часто – существенно), но появляется новый столбец (каналы выкинуты не из модели, а только из графа!)**

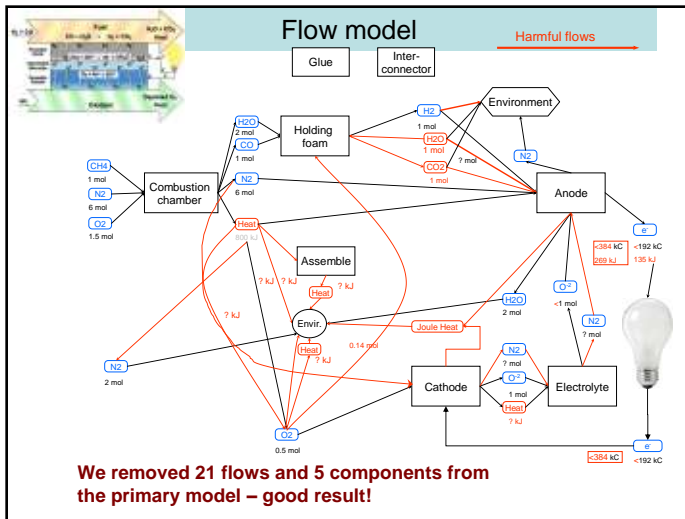


### Flow model (table)

Flow	Source	Object	Value
Power	Grid	Fuel pump	?
CH4	Delivery system	Combustion chamber	1 mol
N2	Compressor	Combustion Chamber	6 mol
O2		Combustion Chamber	1.5 mol
H2O		Holding foam	2 mol
N2		Holding foam	6 mol
CO		Holding foam	1 mol
Heat		Combustion Chamber	
Heat		Environment	800 kJ
Heat		Air of cathode branch	
Heat		Porous holder	
N2		Assemble	?
Heat		Assemble	?
H2O			<1 mol
CO2			<2 mol
H2		Contact mesh	<1 mol
N2		Contact mesh	<6 mol
Heat			?
H2O		Environment	<1 mol
CO2		Environment	<2 mol
H2		Environment	<1 mol
N2		Environment	<6 mol
.....	.....	.....	.....
O2	Porous holder	Holding foam	-0.14 mol

**Full table consist of 56 flows!**

**We strongly need to simplify the model.**



### Flow model (table)

Flow	Source	Channel	Object	Value
CH4		Pump		1 mol
N2	Supersystem	Delivery system	Combustion chamber	6 mol
O2		Delivery system	Combustion chamber	1.5 mol
H2O		Delivery system	Holding foam	2 mol
CO		Delivery system	Holding foam	1 mol
N2		Delivery system + Holding foam	Anode	5(?) mol
N2		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode	1(?) mol
Heat		Delivery system + Holding foam	Anode	
Heat		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode	800 kJ
Heat		Delivery system + Holding foam + Porous holder	O2	
Heat		Delivery system + Holding foam	Environment	
Heat		Delivery system + Holding foam	Assemble	
H2		Holding foam	Anode	Y mol
H2O		Holding foam	Anode	X mol
CO2		Holding foam	Anode	Z mol
H2		Holding foam + Delivery system	Environment	1-(Y) mol
H2O		Holding foam + Delivery system	Environment	1 mol
CO2		Holding foam + Delivery system	Environment	1 mol
N2	Anode			
.....	.....	.....	.....	.....
O2	Supersystem	Air delivery pipe + Porous holder	Holding foam	-0.14 mol

**Составление модели закончено.  
На этом слайде - сравнение двух форматов (с каналами и без)**

# Flow model (table)

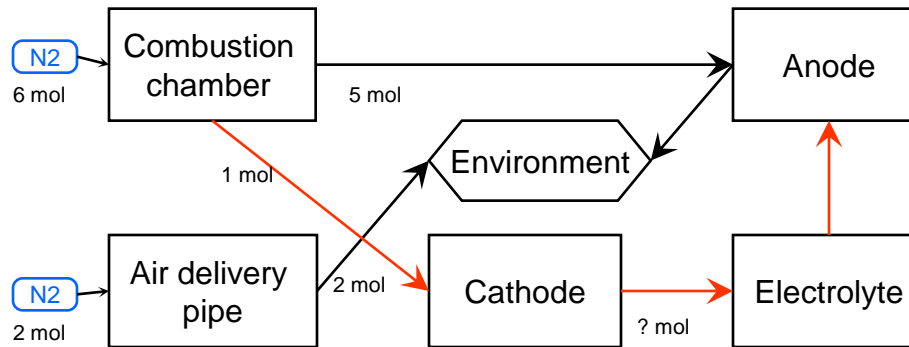
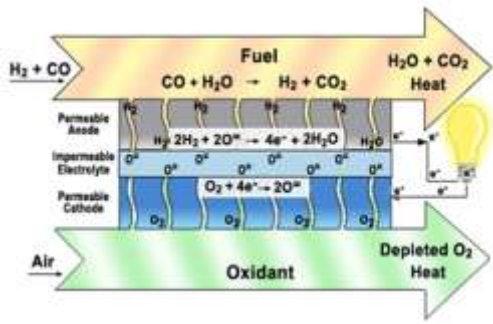
Flow	Source	Channel	Object	Value	Status	Level	
CH4	Supersystem	Pump	Combustion chamber	1 mol	Useful	Adequate	
N2		Delivery system		6 mol	Harmful	High	
O2				1.5 mol	Useful	Adequate	
H2O	Combustion chamber	Delivery system	Holding foam	2 mol	Useful	Adequate	
CO		Delivery system		1 mol	Useful	Adequate	
N2		Delivery system + Holding foam	Anode	5(?) mol	Harmful	Low	
N2		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode	1(?) mol	Harmful	Middle	
Heat		Delivery system + Holding foam	Anode	800 kJ	Useful	Adequate	
Heat		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode		Harmful	Low	
Heat			N2		Harmful	High	
Heat			O2		Useful	Adequate	
Heat			Environment		Harmful	High	
Heat		Delivery system + Holding foam	Assemble		Harmful	Middle	
H2		Holding foam	Holding foam	Anode	Y mol	Useful	Insufficient
H2O					X mol	Harmful	Low
CO2	Z mol				Useful	Adequate	
H2	Holding foam + Delivery system		Environment	1-(Y) mol	Harmful	Middle	
H2O				1 mol	Harmful	High	
CO2				1 mol	Harmful	Low	
N2				Anode	?	Harmful	Low
....	....		....				
O2	Supersystem	Air delivery pipe + Porous holder	Holding foam	~0.14 mol	Harmful	High	
O2	Supersystem	Air delivery pipe + Porous holder + Cathode	Anode	~0.36 mol	Useful	Insufficient	

Шаг 12. Ввести в таблицу «аналитические» столбцы.

1. Разделить потоки на полезные и вредные («нейтральные» считать за вредные)
2. Вредные описать в терминах Low-Middle-High (допустимо более подробное деление, но это уже гораздо сложнее)
3. Полезные описать в терминах Adequate – Insufficient – Excessive (опять же: можно и более детально, если есть возможность, то лучше численно; но такая возможность есть только изредка)

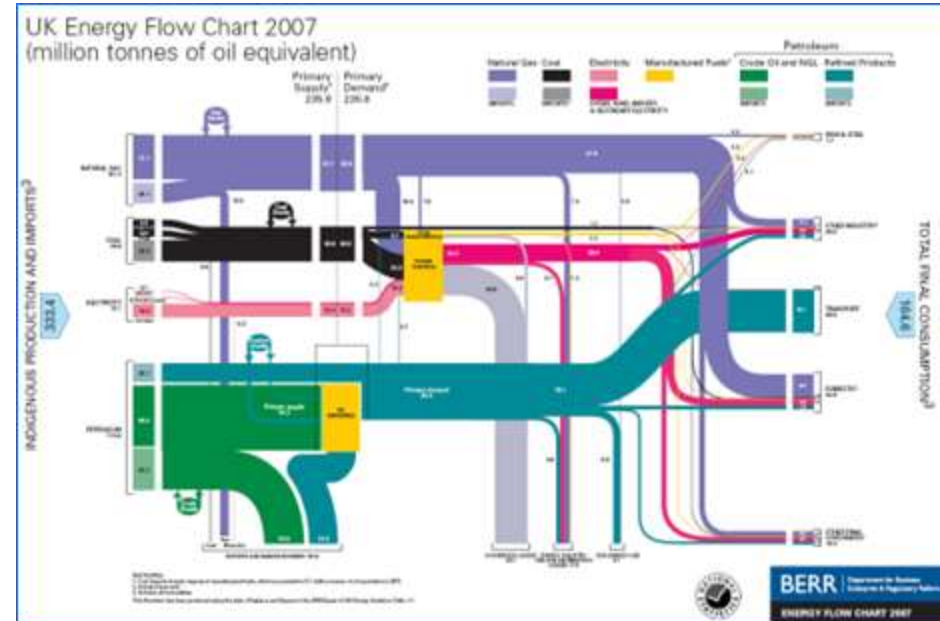
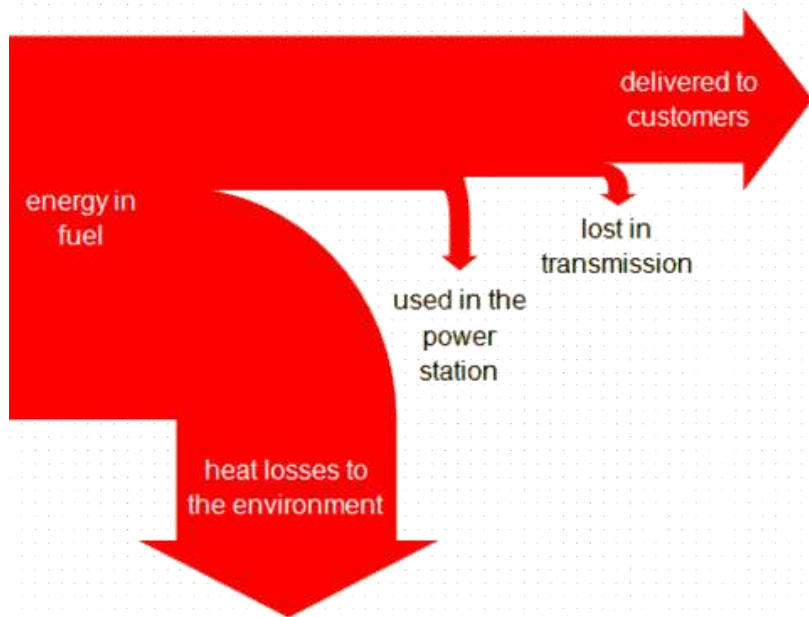
# Flow model. Nitrogen

Harmful flows



Шаг.13. выделить из модели фрагменты для однородных потоков.  
На этом слайде это потоки для азота

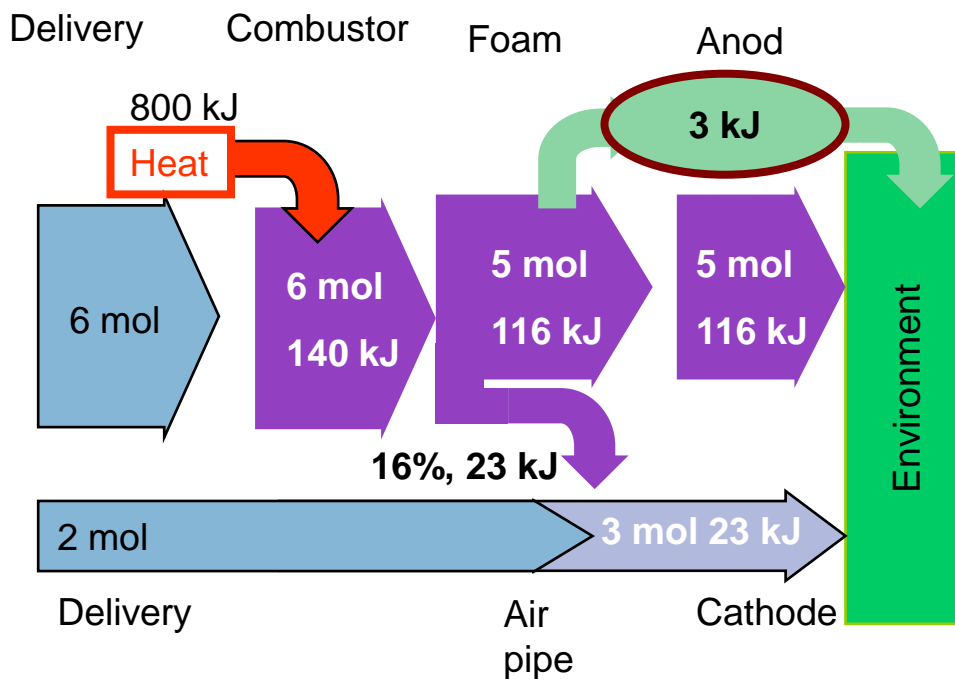
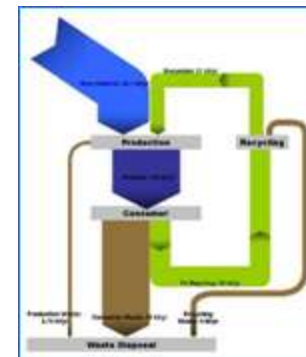
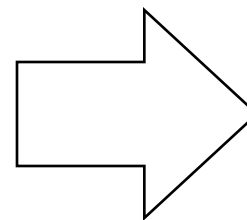
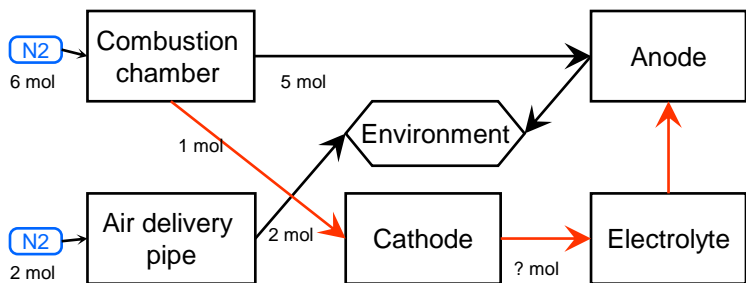
# Sankey diagram



Отступление. Для однородных потоков (все потоки азота, все потоки тепла и т.д.) бывает удобно нарисовать Sankey diagrams. На самом деле, просто наглядней, но это тоже немало.

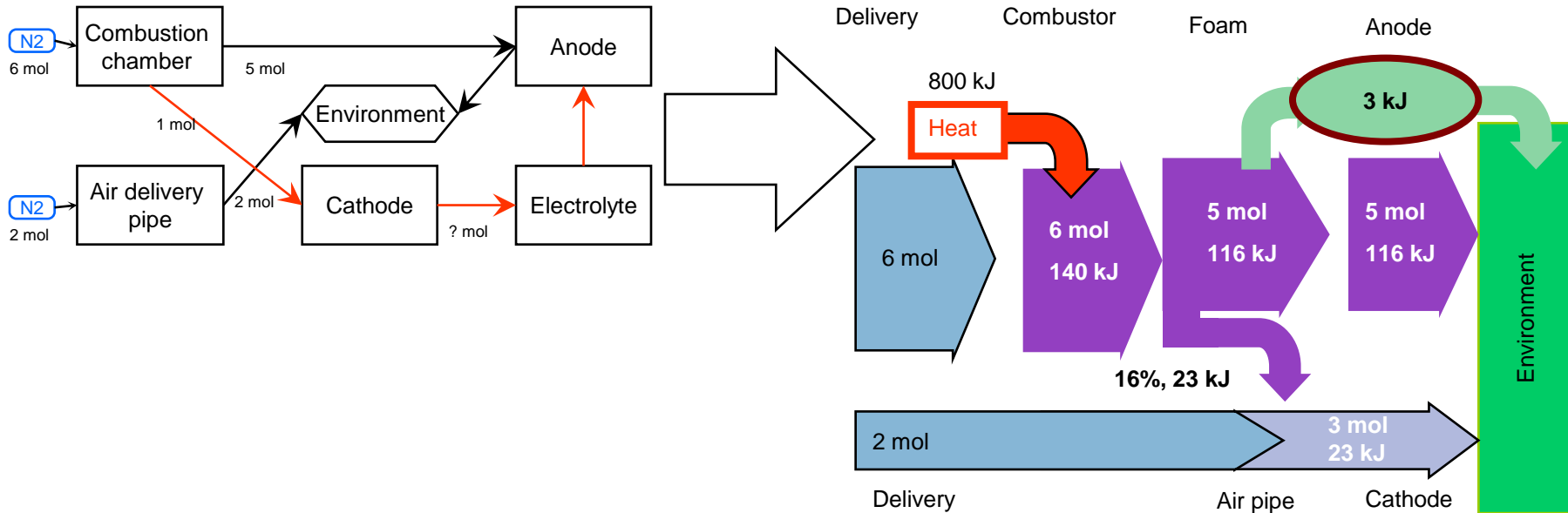


# Flow model. Nitrogen



Шаг 13А. Указать на фрагменте сопутствующие потоки (на самом деле здесь фрагмент не для азота, а для азота + связанных с ним потоков тепла)

# Flow model. Nitrogen



## Primary contradiction:

•Nitrogen flows should be eliminated from system as it causes heat loss

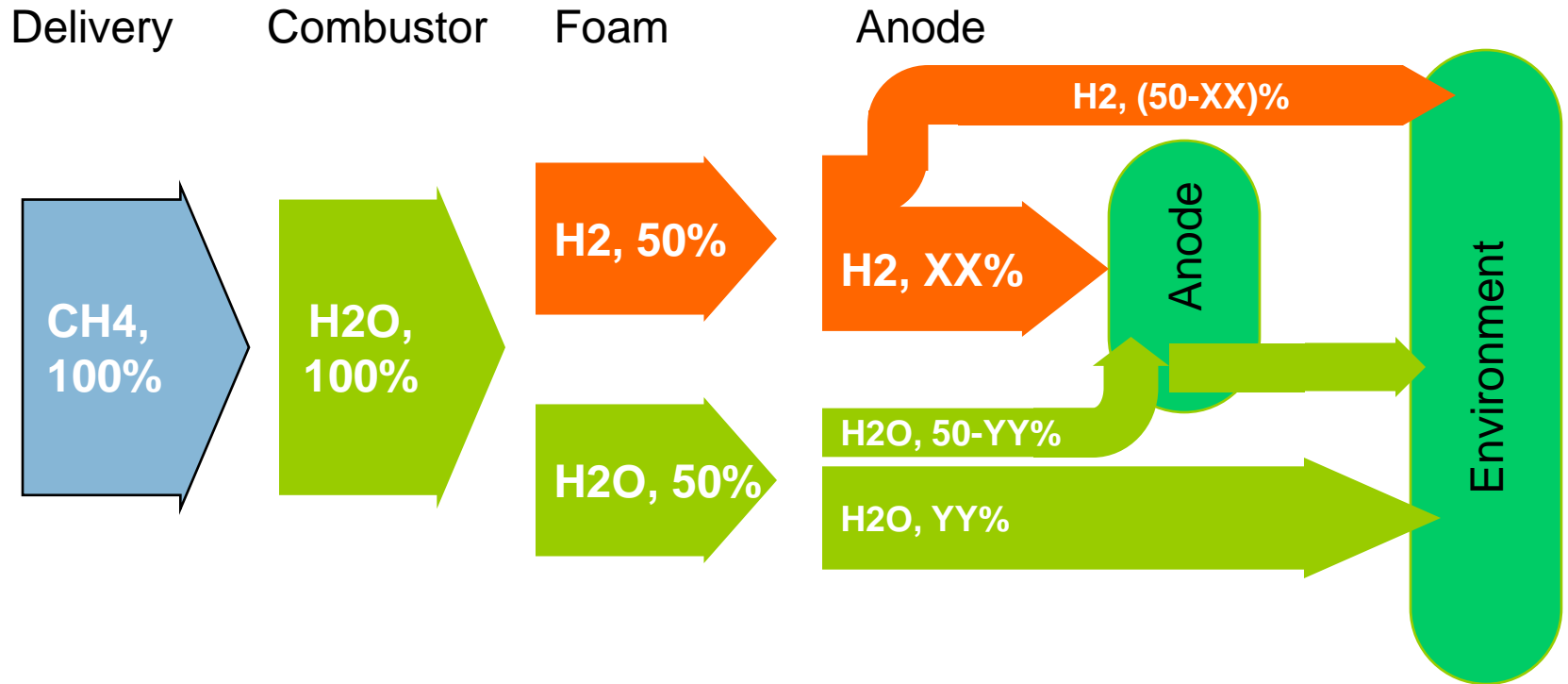
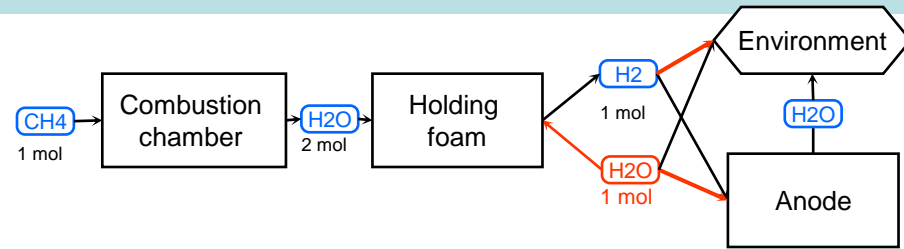
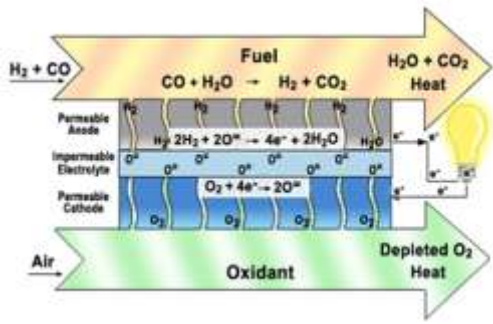
**BUT**

•Nitrogen flows cannot be eliminated due to its content in air

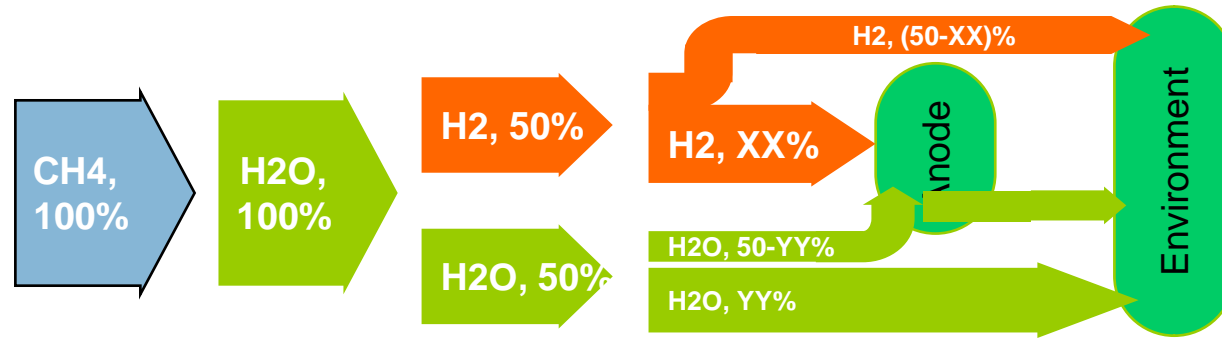
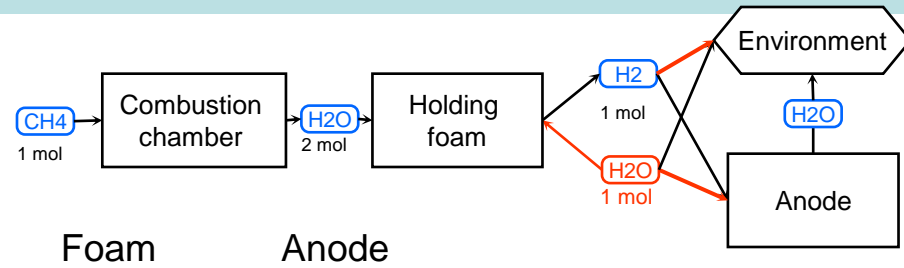
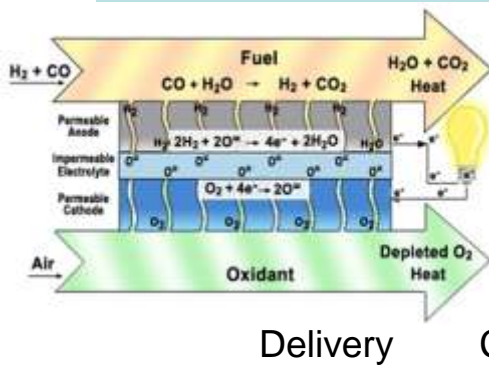
На шаге 13 не всегда, но очень часто можно уточнить недостатки.

Недостатки были выявлены при обозначении потоков как вредных или полезных, но неадекватных. Здесь они уточняются вплоть до формулирования противоречий.

# Flow model. Hydrogen



# Flow model. Hydrogen



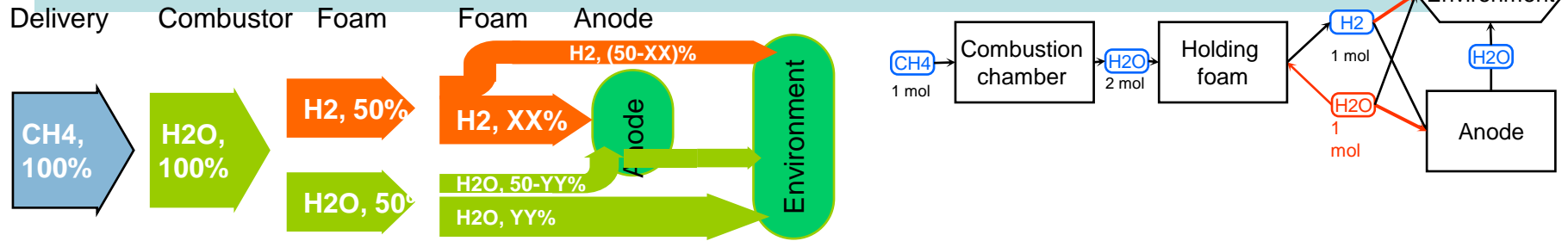
In the holding foam (which is the source and channel at the same time) Hydrogen flow divides to 4 parts:

- H2 to Anode – main useful flow
- H2 to Environment – harmful flow (caused by ejection effect)
- H2O to Anode – harmful flow which damages Anode
- H2O to Environment – harmful flow which deletes part of hydrogen from system.

**Thus have 3 important disadvantages and 3 corresponding problems: how to eliminate harmful flows?**

Легко увидеть, что меньше половины водорода (главного потока по принципу действия) «идет в дело». Опять же – недостаток стал более очевидным и понятным

# Flow model. Hydrogen



**H<sub>2</sub>O to Environment – harmful flow which deletes part of hydrogen from system**

## The primary contradiction is:

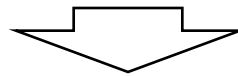
All hydrogen should reduce from water because it is main useful flow BUT only half of hydrogen can reduce from water due to insufficient amount of reductant (CO).

## OR:

Reductant amount should be high to reduce all hydrogen, BUT it is low due to chosen primary fuel.

Solution idea:

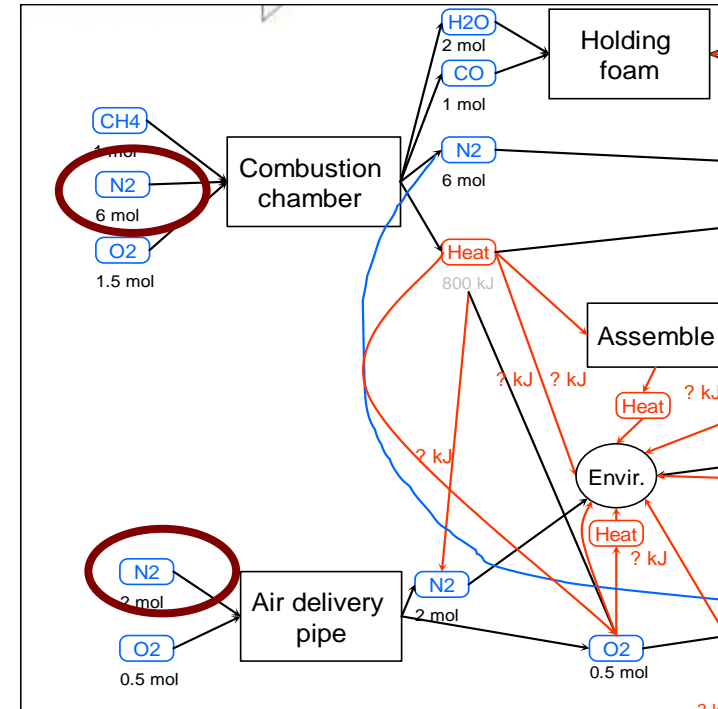
To use another hydrocarbon which have more ratio of Carbon and Hydrogen:



# Harmful primary flows

Attribute	Type
By usability	Useful
	<b>Harmful</b>
By source	<b>Primary</b>
	Secondary
	Parasitic
By importance	Main
	Auxiliary
By functionality	Functional
	Carrier
By openness	Open
	Closed

**Main recommendation is to stop this flow. If it is impossible to decrease conductivity as possible**



Thus the first solution is to stop N2 => to use Oxygen instead of air.

If it is impossible we need to decrease conductivity of Nitrogen channel. BUT it is the same channel as for Oxygen. It seems to be impossible. So we have a good contradiction:

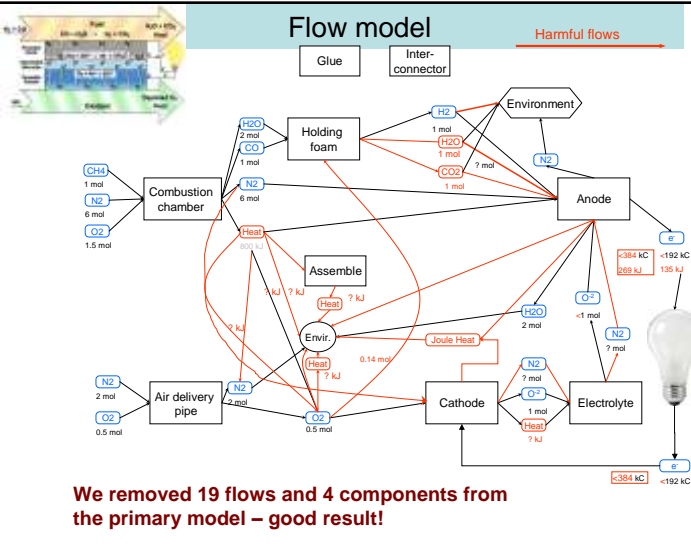
**The Air delivery pipe and gas delivery pipes should have high conductivity to conduct O2 and CH4, but at the same time these pipes should have low conductivity to stop N2.**

Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.

Первичные вредные потоки здесь – азот воздуха, который выполняет в системе одну полезную функцию – нагревает анод (но это же делают и другие потоки), но имеет важную вредную функцию – уносит значительную часть тепловой энергии. Типовая рекомендация – предотвратить поток.

Кстати, здесь хорошо видна некоторая условность разделения потоков на полезные и вредные.

# SOFC Flows classification

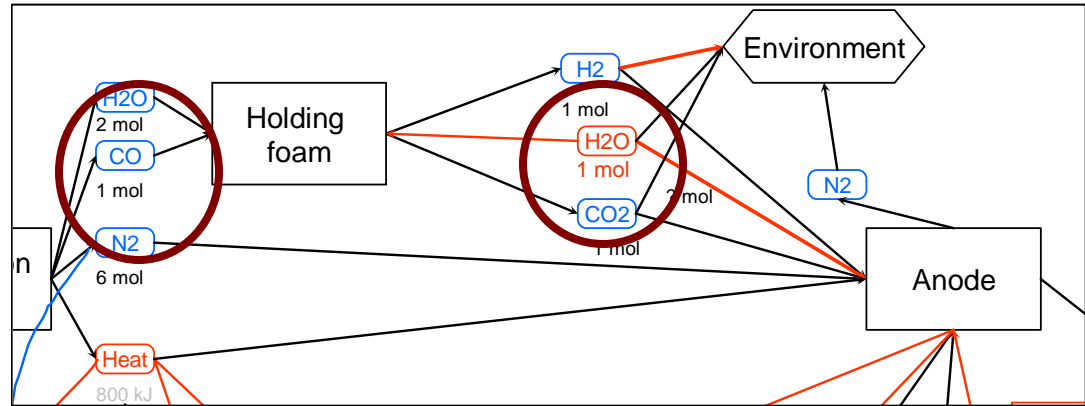


Flow	Source	Channel	Object	Value	Status
CH4	Supersystem	Pump	Combustion chamber	1 mol	Useful
N2		Delivery system		6 mol	Harmful
O2				1.5 mol	Useful
H2O	Combustion chamber	Delivery system	Holding foam	2 mol	Useful
CO		Delivery system		1 mol	Useful
N2		Delivery system + Holding foam	Anode	5(?) mol	Harmful
N2		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode	1(?) mol	Harmful
Heat		Delivery system + Holding foam	Anode	800 kJ	Useful
Heat		Delivery system + Holding foam + Porous holder	Cathode		Harmful
Heat			N2		Harmful
Heat			O2		Harmful
Heat			Environment		Harmful
Heat		Delivery system + Holding foam	Assemble		Harmful
H2	Holding foam	Holding foam	Anode	Y mol	Useful
H2O				X mol	Harmful
CO2				Z mol	Harmful
H2		Holding foam + Delivery system	Environment	1-(Y) mol	Harmful
H2O				1 mol	Harmful
CO2				1 mol	Harmful
N2				?	Harmful
....	....	....	....	....	
O2	Supersystem	Air delivery pipe + Porous holder	Holding foam	~0.14 mol	Harmful
O2	Supersystem	Air delivery pipe + Porous holder + Cathode	Anode	~0.36 mol	Useful

Необходимо просмотреть и классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки по классификационным признакам. И применить стандартные рекомендации.

# Useful and harmful secondary flows

Attribute	Type
By usability	<b>Useful</b>
	<b>Harmful</b>
By source	Primary
	<b>Secondary</b>
	Parasitic
By importance	Main
	Auxiliary
By functionality	Functional
	Carrier
By openness	Open
	Closed



**For secondary flows we can change not channel only but source as well.**

H<sub>2</sub> flow is secondary useful one. And it do not generates quite adequately: half of hydrogen is utilized as water and lost at this step.

H<sub>2</sub>O (after Holding foam) is secondary harmful flow

The problem: how to reduce all water (or more part of water) to H<sub>2</sub>?



CO is a reductant here and we have insufficient amount.

Real problem to be solved is: **“How to increase reductant amount?”**

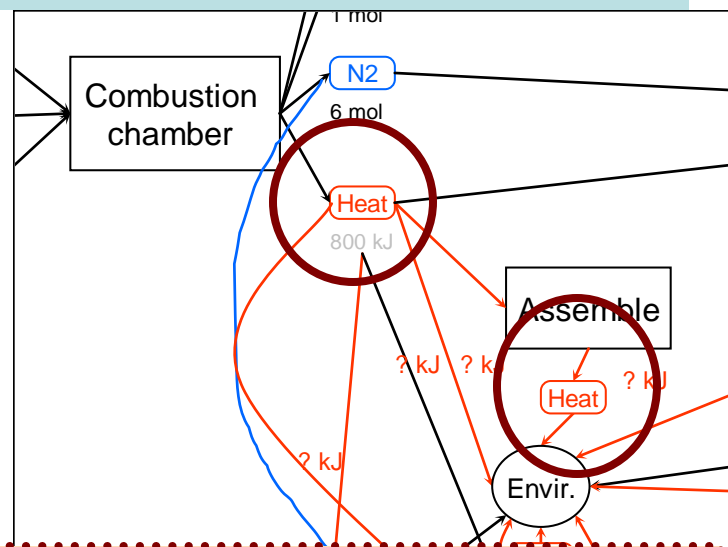
Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.

В отношении вторичных потоков (как полезных, так и вредных) появляется возможность манипулировать каналом.



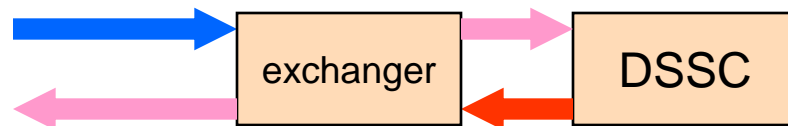
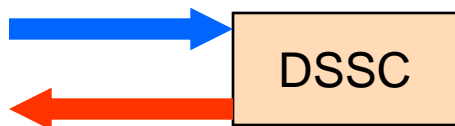
# Harmful secondary flows

Attribute	Type
By usability	Useful
	<b>Harmful</b>
By source	Primary
	<b>Secondary</b>
	Parasitic
By importance	Main
	Auxiliary
By functionality	Functional
	Carrier
By openness	Open
	Closed



**If we cannot prevent secondary harmful flow we can try to use it (to do it useful). If we cannot we need to remove it as soon as possible**

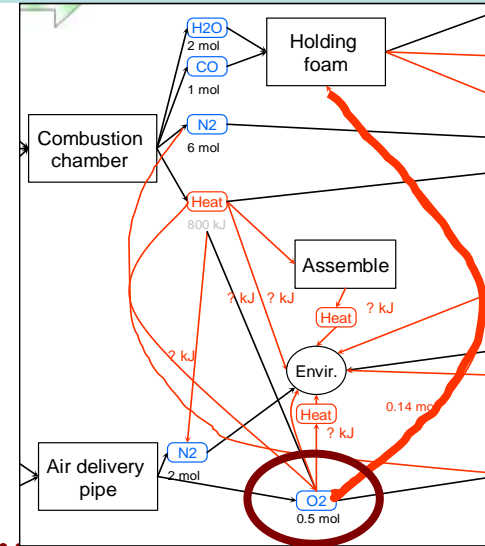
Heat after combustion chamber is useful only as heating Anode. The heat flow through assemble to environment is obviously harmful one: the more part heat was utilized to heat assembly the less part was utilized to heat Anode.



Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.  
 Вредный вторичный поток нужно попытаться использовать.

# Parasitic flows

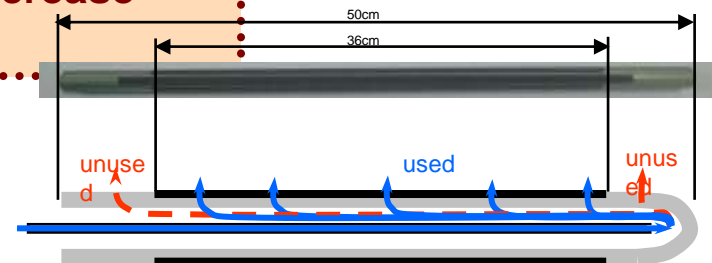
Attribute	Type
By usability	Useful
	<b>Harmful</b>
By source	Primary
	Secondary
	<b>Parasitic</b>
By importance	Main
	Auxiliary
By functionality	Functional
	Carrier
By openness	Open
	Closed



**Parasitic flow should be prevented.**

**If we cannot do it we should decrease channel conductivity at the parasitic flow appearance.**

**If we cannot decrease it there we should remove it (increase channel conductivity) as soon as possible.**



Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.

Паразитный поток может быть устранен по определению. Поэтому главная рекомендация – устранить его. Если не удастся – рассматривать просто как обычный вредный.

# Example. Automobile flows

## **Separation of components in terms “source/channel/flow/tool” is obvious:**

- The flows are the streams of gasoline, air, exhaust gas, coolant etc,
- Channels for them are gasoline pipe, air pipe, the cooling air exhaust etc,
- The source of exhaust gas is the combustion chamber,
- The “Product” of cooling air is a heat exchanger, etc.

## **Main useful flows (according to the engine action principal) are:**

- Gasoline flow,
- Air (as oxidant) flow (to engine),
- Coolant flow.

## **Auxiliary useful flows are:**

- Flow of various additives in gasoline,
- Flow of oil in the engine.

## **Outer useful flows are:**

- Two of main flows (gasoline and oxidant),
- Additives flow.

## **Inner useful flows are:**

- Oil flow,
- The flow of burned gases in the cylinders and out of the cylinders,

**Outer harmful flows are:** any pollutants in gasoline and air.

**Inner harmful flows are:** the flows of carbon dioxide and water vapor produced during the combustion of gasoline.

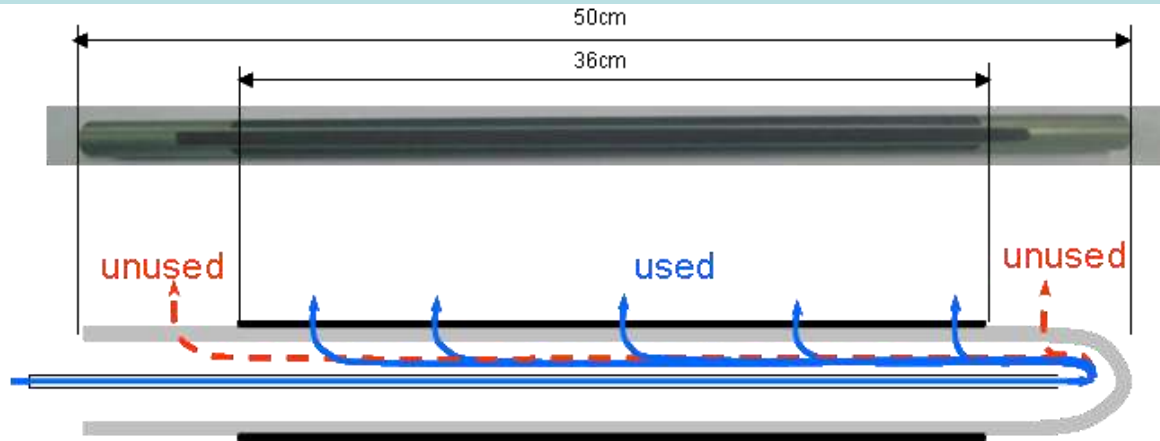
## **Parasitic flows are:**

- The flow of nitrogen oxides and carbon monoxide,
- The flow of the products of destruction of gasoline additives
- The flow of pollutants in the oil

## **Separation of flows by function/carrier (“rider/horse”) is obvious too:**

- Coolant (air or liquid) is a typical carrier (“horse”) of heat
- The flow of heat (cold) is a typical functional (“rider”) that, in fact, makes it easy to change the media (“horse”).

# Oxygen losses



Used square is ~72%

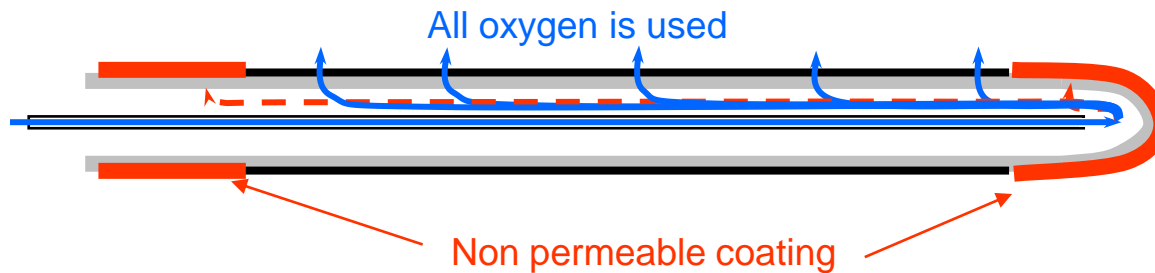
Used oxygen ~72%

Useful reaction  $\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$

competes with reaction  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$

Cell efficiency decreases nearly 2 times  
( $0.72 \cdot 0.72 \approx 0.5$ )

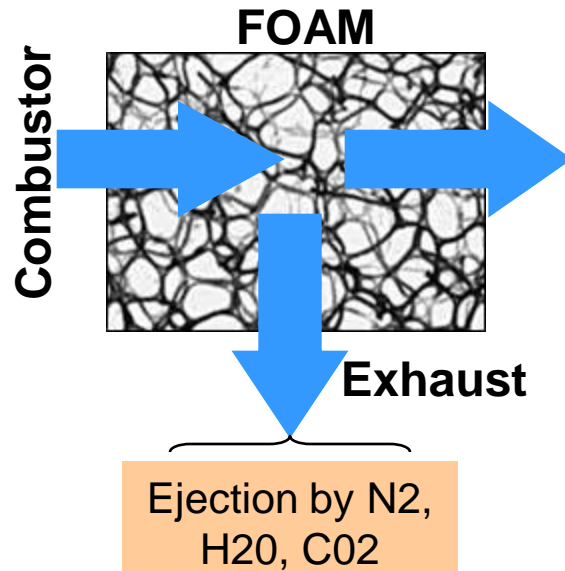
**How to prevent this parasitic flow? – lock the parasitic flow channel:**



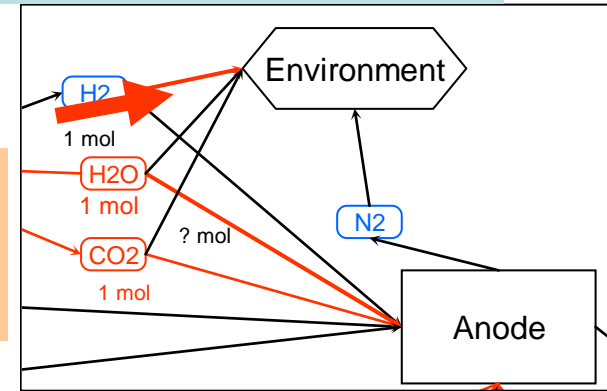
Вариант решения по устранению паразитного потока манипулированием канала – перекрыть канал.

# Harmful functional flows

Attribute	Type
By usability	Useful
	<b>Harmful</b>
By source	Primary
	<b>Secondary</b>
By importance	Main
	<b>Parasitic</b>
By functionality	Functional
	Carrier
By openness	Open
	Closed



to Anode  
Partial hydrogen pressure



Exhaust gases eject H<sub>2</sub> and move it out of system. These exhaust gases are carrier for hydrogen.

**To prevent ( or decrease) harmful functional we can eliminate (or decrease) carrier flow**

**Thus the problem is: how to decrease density or speed of exhaust gasses flows? – we discussed earlier how can we fully prevent N<sub>2</sub> and to decrease amount of H<sub>2</sub>O**

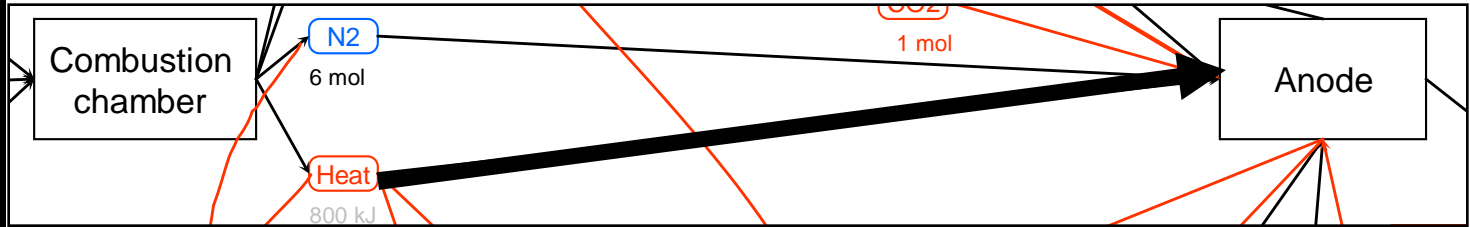
Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.

В случае потоков функционалов появляется еще одна возможность ими манипулировать – изменять поток-носитель.

В данном примере при уменьшении объема выхлопных газов (а мы можем уменьшить азот и воду) уменьшится эжекционный поток водорода в выхлоп.

# Carriers for useful functional

Attribute	Type
By usability	<b>Useful</b>
	Harmful
By source	Primary
	Secondary
	Parasitic
By importance	Main
	Auxiliary
By functionality	Functional
	<b>Carrier</b>
By openness	Open
	Closed



**Very often the single useful function of carrier flow is to move functional flow. All other functions are often harmful!**

**But very often we can easily change the carrier or its parameters.**

In our system the single useful function of heat is to **heat Anode**. It causes a lot of harmful functions (any other components and flows are heated too). The problem is: **how to prevent heating of components** (while heating anode only)? Due to this recommendation the problem can be reformulated: **how to change heat carrier (from exhaust gasses to another matter) to prevent components heating?**

**Possible solution:**

**to heat Anode by Joule heat of current in the collector grid.**

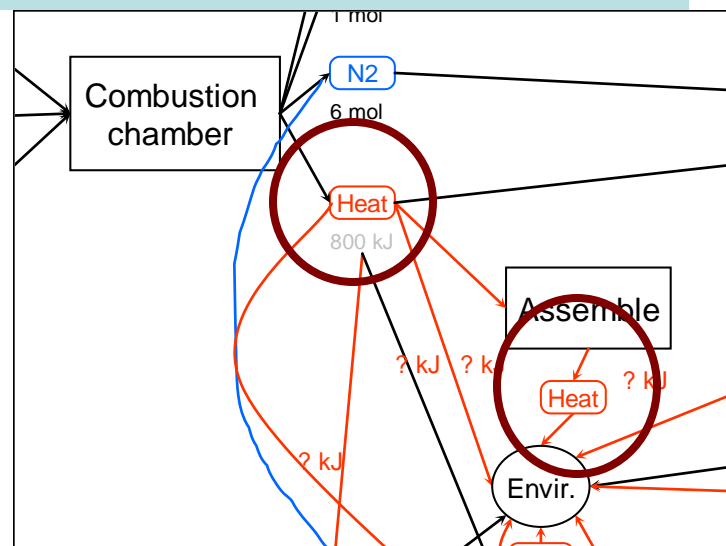
Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.

При классификации потока как носителя мы всегда можем найти замену носителю. Часто это бывает выгодно.

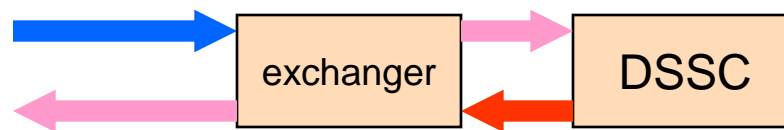
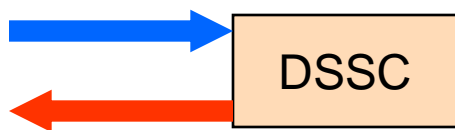
# Open vs closed flows

Attribute	Type
By usability	Useful
	<b>Harmful</b>
By source	Primary
	Secondary
	Parasitic
By importance	Main
	Auxiliary
By functionality	Functional
	Carrier
By openness	<b>Open</b>
	Closed

Only open flows are  
in our model



**The main recommendation is to look is not it usable to change open flow to closed (to prevent losses) or to change closed flows to open (to remove something from system)**



Шаги 14-17. Классифицировать все вредные или неадекватно выполняемые полезные потоки, сформулировать недостатки и задачи на их устранение.

Рекомендация простая: попробовать заменить открытый поток на закрытый и наоборот