



Корпоративный фонд «Центр компетенций по экологическим технологиям»

# Электронно-лучевая очистка дымовых газов угольных тепло-электростанций

**Ахан Омирбек**

кандидат технических наук





## Текущая ситуация в сфере очистки топочных газов

Окислы азота и серы в газовых выбросах ТЭЦ, металлургических и других производств наносят значительный экологический ущерб: кислотные дожди, закисление почв и открытых водоемов, образование смога, гибель лесов и др.





## **Основные проблемы при применении ныне практикуемых способов очистки промышленных выбросов:**

- Низкая рентабельность химических способов очистки;
- Низкая эффективность физических способов при очистке газовых фракций;
- Высокая стоимость «мокрых» способов очистки уходящих газов;
- Загрязнение водной среды и почв при применении «мокрых» способов очистки уходящих газов;
- Интенсивное загрязнение атмосферы планеты Земля;
- Отсутствие дешёвых и эффективных способов утилизации парниковых газов.



Длительный опыт эксплуатации химической очистки выявил ряд существенных недостатков химических способов очистки:

- установки очень дорогие (капитальные затраты составляют 25-100% от стоимости энергоблока);
- эксплуатационные расходы достигают 15% от мощности энергоблока;
- размеры установки сравнимы с размерами энергоблоков (для некоторых ТЭС даже превосходят их), что затрудняет оснащение действующих производств системами очистки;
- установки медленно изменяют режим работы;
- в результате работы установки образуются мокрые твердые отходы, требующие дальнейшей переработки.
- Кроме того, объем получающихся в масштабах Германии отходов таков, что их не выгодно перерабатывать и значительную часть захоранивают, как отходы.



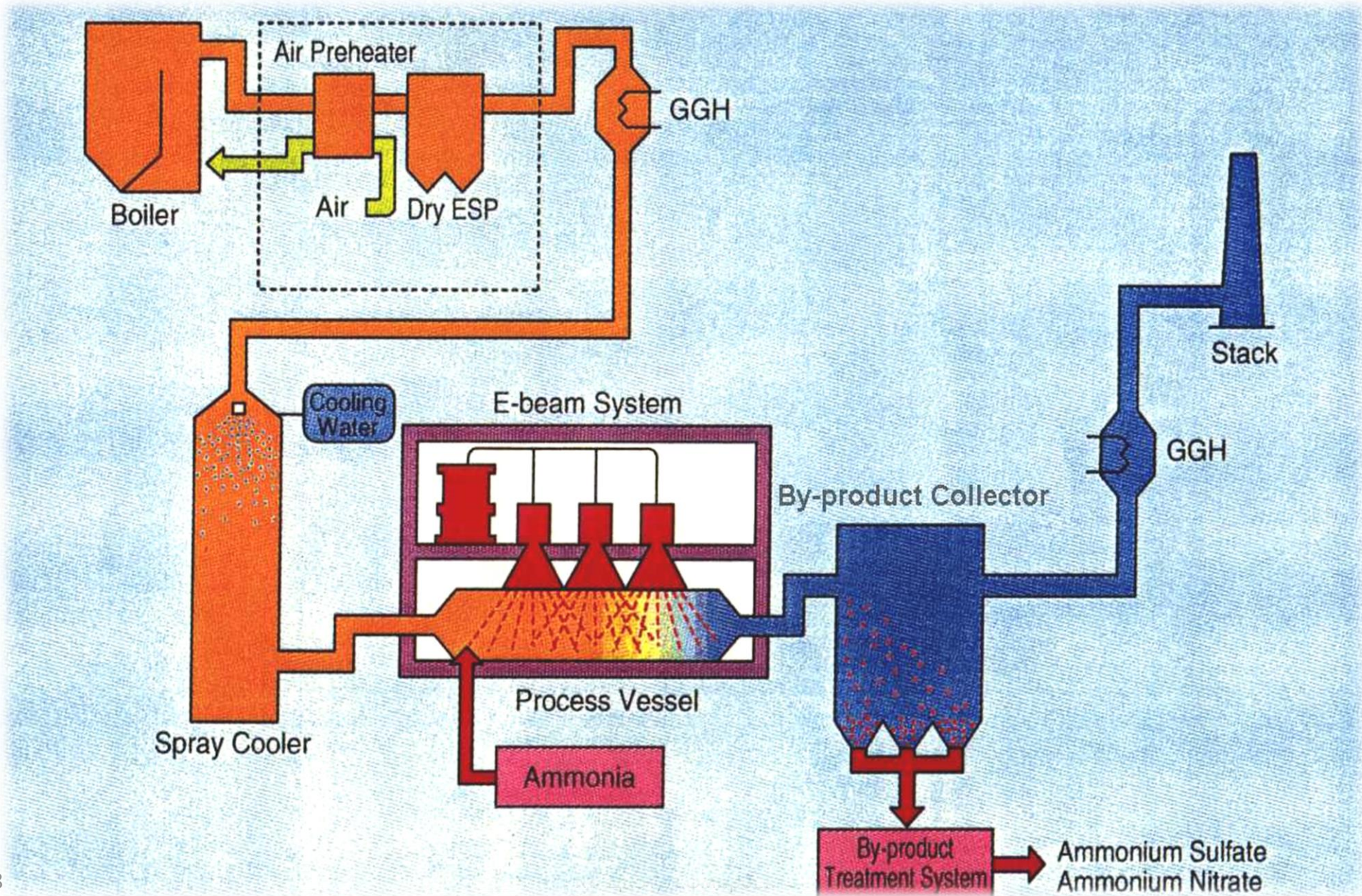
## Электронно-лучевая технология очистки от NOx и SO<sub>2</sub> - альтернатива химическому способу очистки дымовых газов

- Технология очистки дымовых газов пучком электронов является одной из самых передовых технологий среди нового поколения способов борьбы с загрязнением воздуха.
- Процесс, который был разработан в Японии, США, Германии и Польше, позволяет одновременно удалять SO<sub>2</sub> и NOx с высокой эффективностью и получением побочного продукта, который может быть применен в качестве удобрения.
- Всего в мире были построены две промышленные установки, использующие эту технологию: одна в Китае и вторая в Польше. Другие заводы построены в Японии и Китае.
- Китайская установка в основном ориентирована на удаление SO<sub>2</sub> (Так как предельные значения выбросов NOx в Китае до сих пор не налагаются), поэтому польский завод - на самом деле первая и единственная установка для одновременной десульфурации и денитрификации дымовых газов.



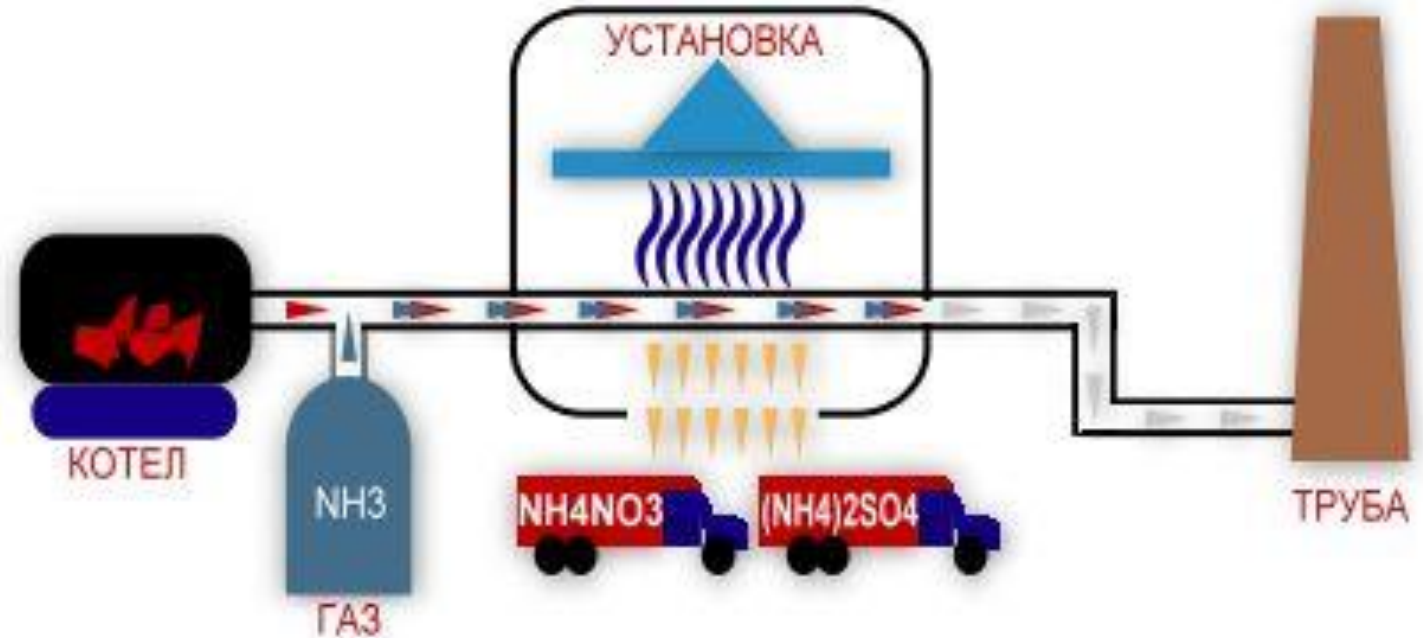
### Основные преимущества установок электронно-лучевой очистки:

- Полная утилизация органического топлива. Установки производят в результате очистки сухие удобрения, имеющие емкий рынок.
- Габариты установок электронно-лучевой очистки в несколько раз меньше установок химической очистки. Это позволяет оснащать такими установками действующие производства.
- Установка быстро меняет режим работы.
- Стоимость строящихся за рубежом установок комплексной электронно-лучевой установки очистки от окислов азота и серы на 25% ниже аналогичных установок химической очистки, а эксплуатационные затраты меньше на 25%.
- Согласно установившемуся мнению ученых-энергетиков, электронно-лучевой процесс очистки топочных газов является основным в угольной энергетике.





- Отходящие газы смешиваются с аммиаком и облучаются пучками электронов.
- После облучения окислы азота и серы превращаются в соли аммония, которые удаляются из дымовых газов с помощью электрофильтра.
- В процессе очистки получают минеральные удобрения, доходы от реализации которых до четырех раз выше, чем затраты на исходные реагенты и собственные нужды очистки.
- Одновременно происходит комплексная очистка от окислов азота, серы, метана, сероводорода, соляной кислоты



- При оснащении электрических станций электронно-лучевой очисткой капитальные затраты составят порядка 0,15-0,25 \$/Вт, что в два раза ниже, чем при использовании химических методов.



# Механизмы реакций и последовательность электронно-лучевого процесса

Передача энергии

Energy Transmission



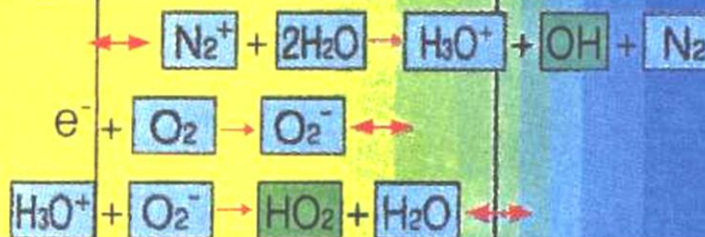
Диссоциация молекул

Molecular Dissociation



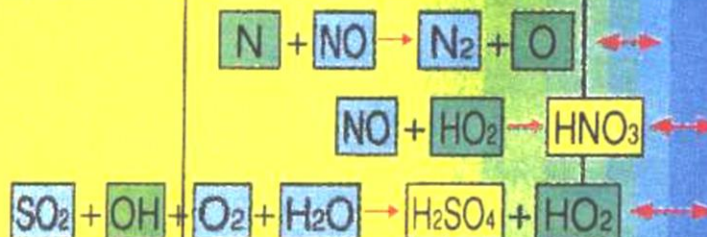
Ионная реакция

Ionic Reaction



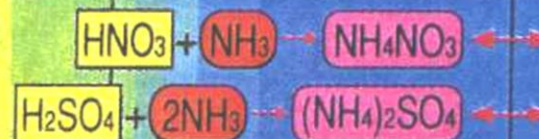
Реакция радикалов

Radical Reaction



Реакция нейтрализации

Neutralization Reaction



Термическая реакция

Thermal Reaction



$10^{-15}$

$10^{-10}$

$10^{-5}$

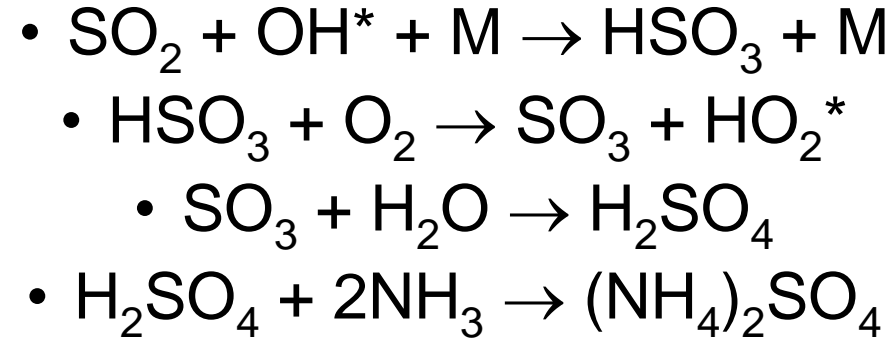
$10^0$

$10^5$

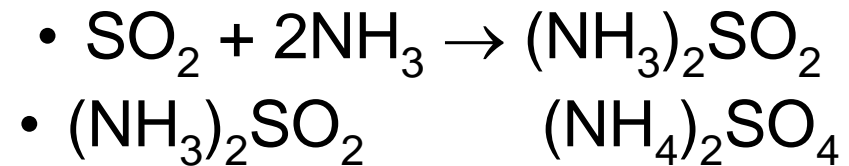
Time (Second)      Время (секунды)



- **Радиотермический**



- **Термический**

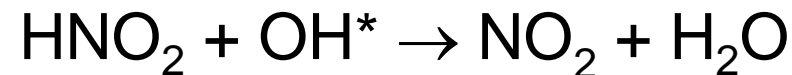
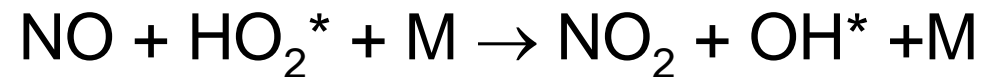
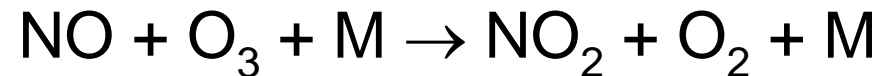
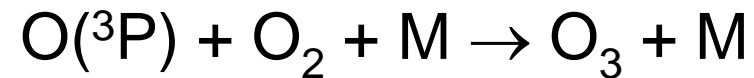
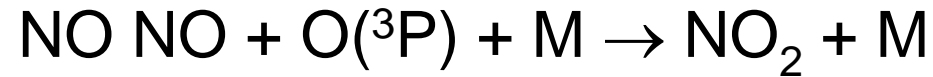


1. H. Namba: Materials of UNDP(IAEA)RCA Regional Training Course on Radiation Technology for Environmental Conservation TRCE-JAERI, Takasaki, September/October 1993, 99-104

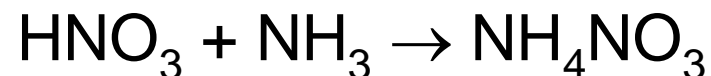
2. A.G. Chmielewski: Nukleonika **45(1)** (2000) 31



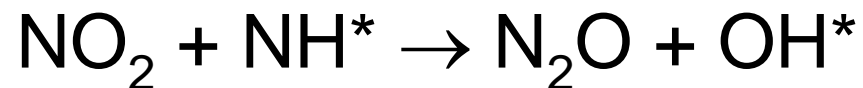
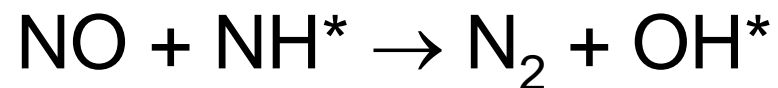
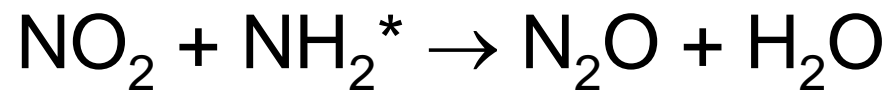
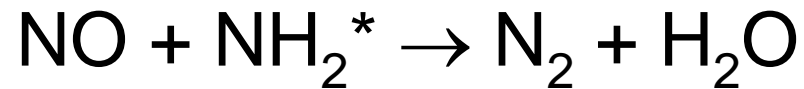
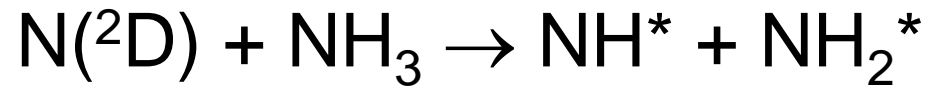
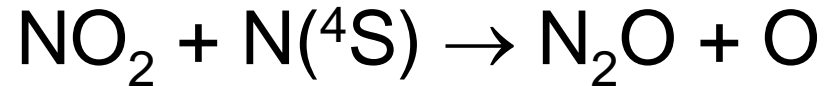
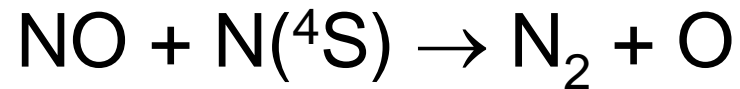
- Окисление



- Удаление NO<sub>2</sub>



H. Namba: Materials of UNDP(IAEA)RCA Regional Training Course on Radiation Technology for Environmental Conservation TRCE-JAERI, Takasaki, September/October 1993, 99-104



H. Namba: Materials of UNDP(IAEA)RCA Regional Training Course on Radiation Technology for Environmental Conservation TRCE-JAERI, Takasaki, September/October 1993, 99-104



- Лабораторная установка ЭЛОУГ была установлена в Институте ядерной химии и технологии в Варшаве в конце 80-х гг.
- Вскоре после лабораторных испытаний, был построен опытный завод на электростанции Kaweczyn (Хмелевски и др., 1992). На этом объекте были испытаны три новых элемента: двухступенчатое облучение, продольное облучение и воздушная завеса под окном реакционной камеры.
- Кроме того, были протестированы три различных системы фильтрации побочного продукта:
  - рукавные фильтры,
  - гравийно-фильтрующий слой
  - электростатический электрофильтр.
- Результаты испытаний, полученные на лабораторной установке и опытно-промышленной установке, позволили создать полномасштабную промышленную установку.



## Общий вид

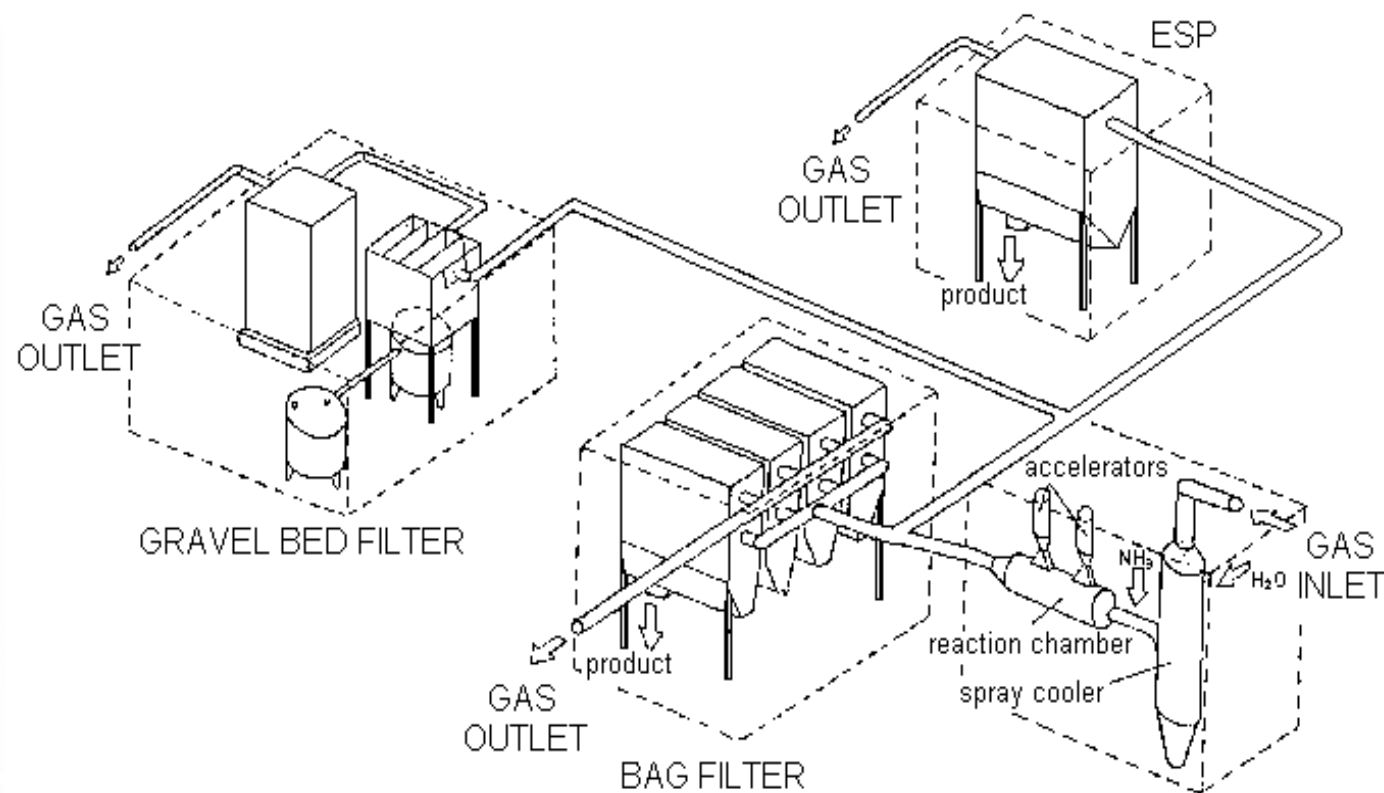
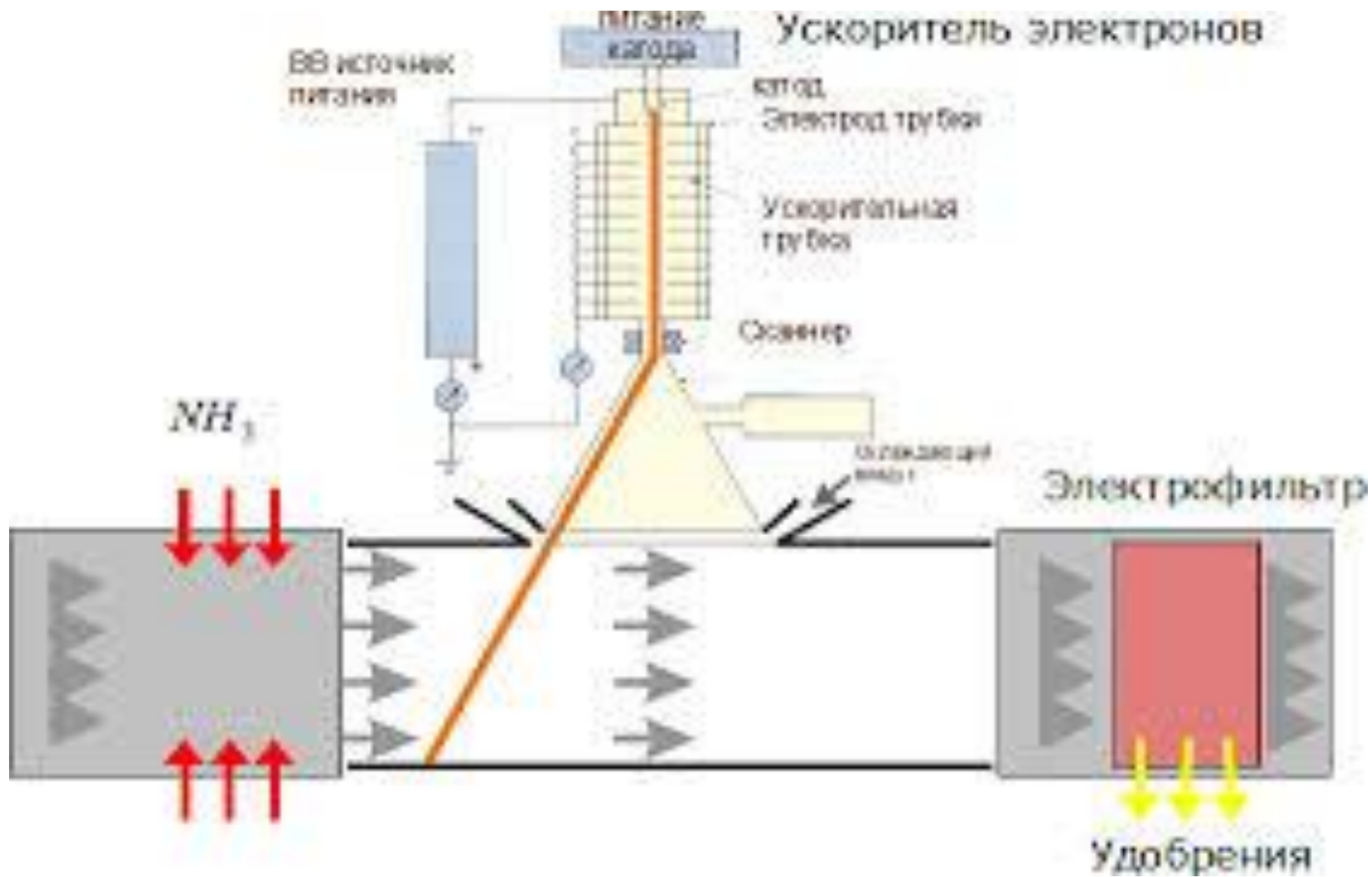
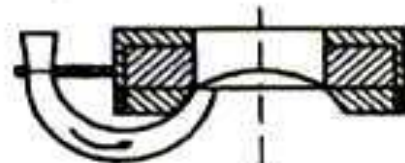
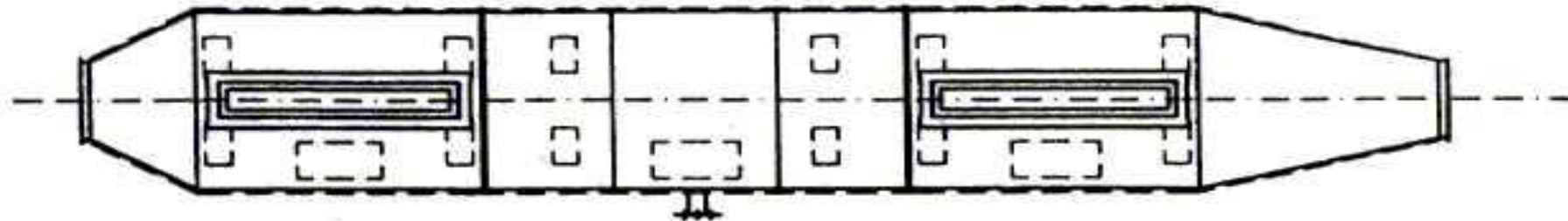
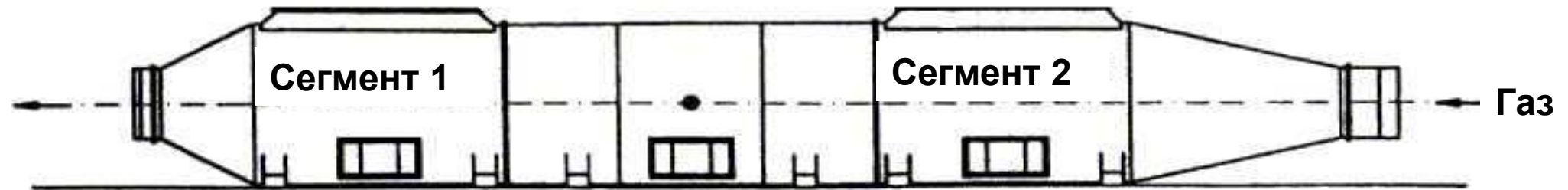


Схема пилотной установки



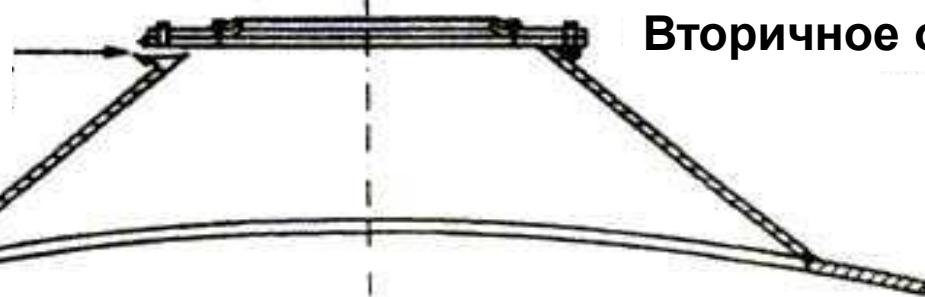


## Облучатель пилотной установки

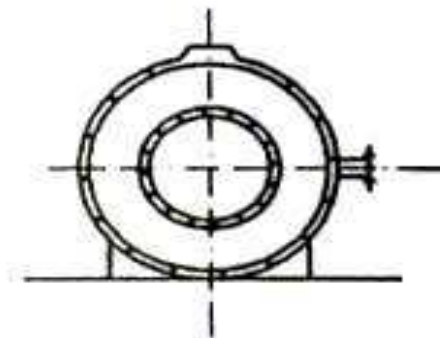


Первичное окно

Воздушный  
поток под  
вторичным  
окном

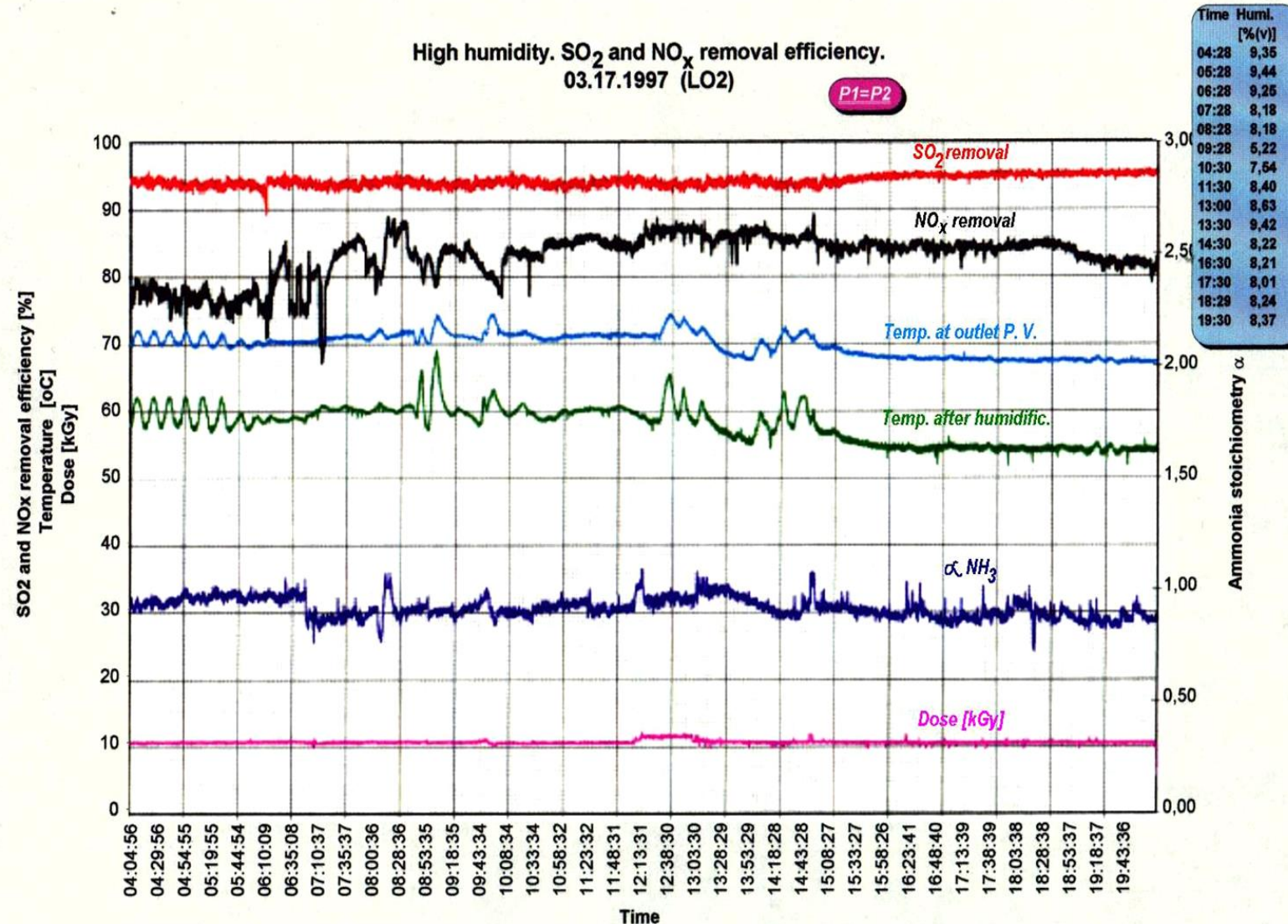


Вторичное окно





# Типичный набор контролируемых параметров на пилотной установке



- Влажность;
- Эффективность удаления SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>, %;
- Температура, oC;
- Дозировка, kGy.



- Первая промышленная установка для одновременного удаления SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> находится на электростанции " Pomorzany " в Щецине, к северу от Польши (Хмелевский и др., 2001).
- Установка очищает дымовые газы из двух Бенсон-котлов по 65MWe и 100MWth каждый, общий максимальный расход 270 000 Nm<sup>3</sup> / ч.
- Полная мощность пучка 1.05MW. Это самый большой ускоритель объект такого рода в мире.
- Установка состоит из четырех основных отдельных систем:
  - блок кондиционирования дымовых газов,
  - Блок хранения аммиака и узел впрыска,
  - реакционные камеры,
  - Узел сбора и склад для хранения побочного продукта.

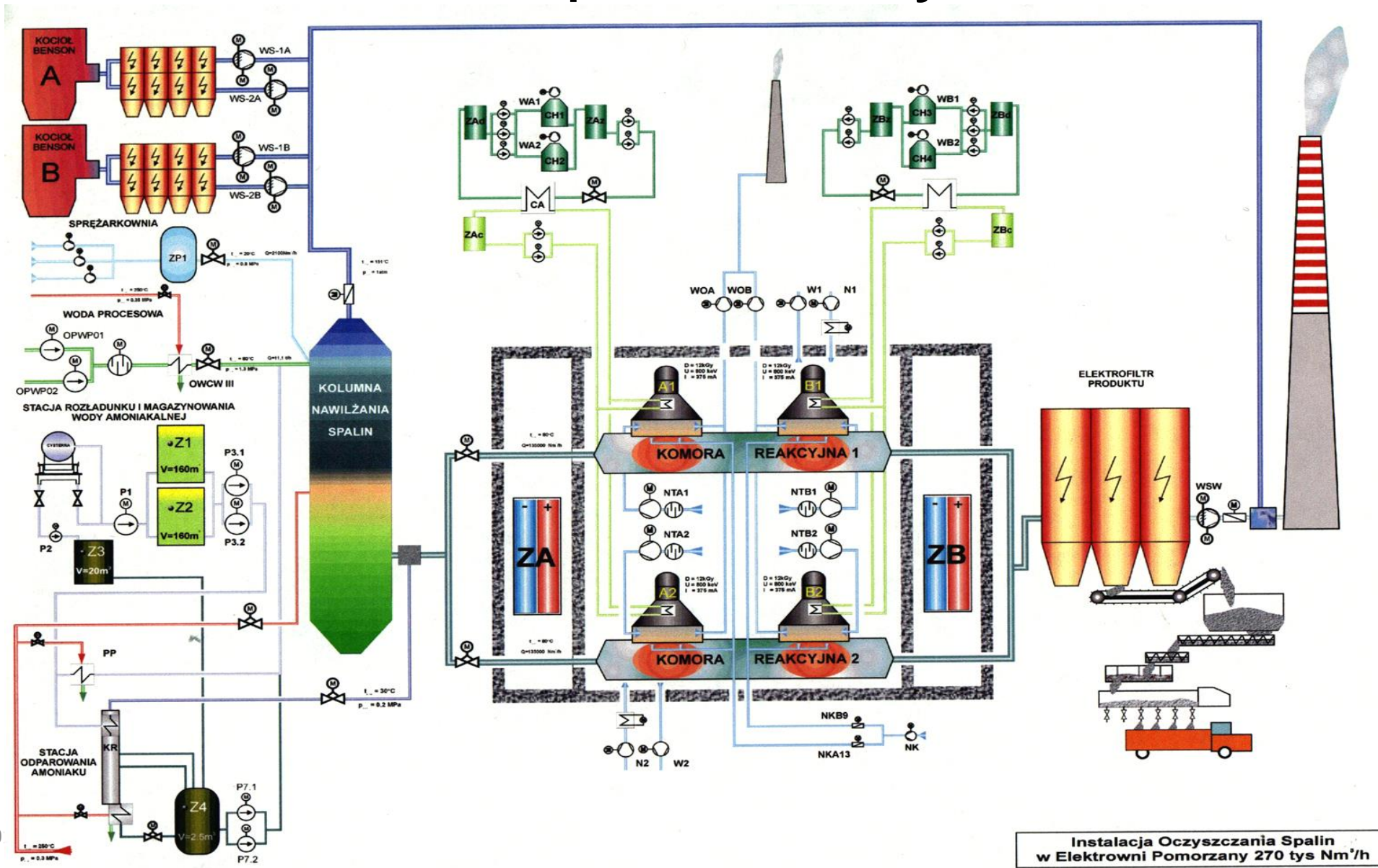




- Перед входом в установку, дымовые газы из котлов обеспыливаются в электрофильтрах и разделяется на два потока.
- Около половины от общего объема дымовых газов направляется на установку, в то время как остальное подается в смеситель перед трубой выброса в атмосферу.
- Очищенная часть газов поступает в сухой нижний распылительный охладитель, где происходит процесс испарения воды. В результате этого температура газов снижается до 65-80 ° С и влажность повышается до 10-14 объемных %.
- При этом, температура и влажность газов с высокой степенью коррелируют друг с другом.



# Схема промышленной установки



10.08.20

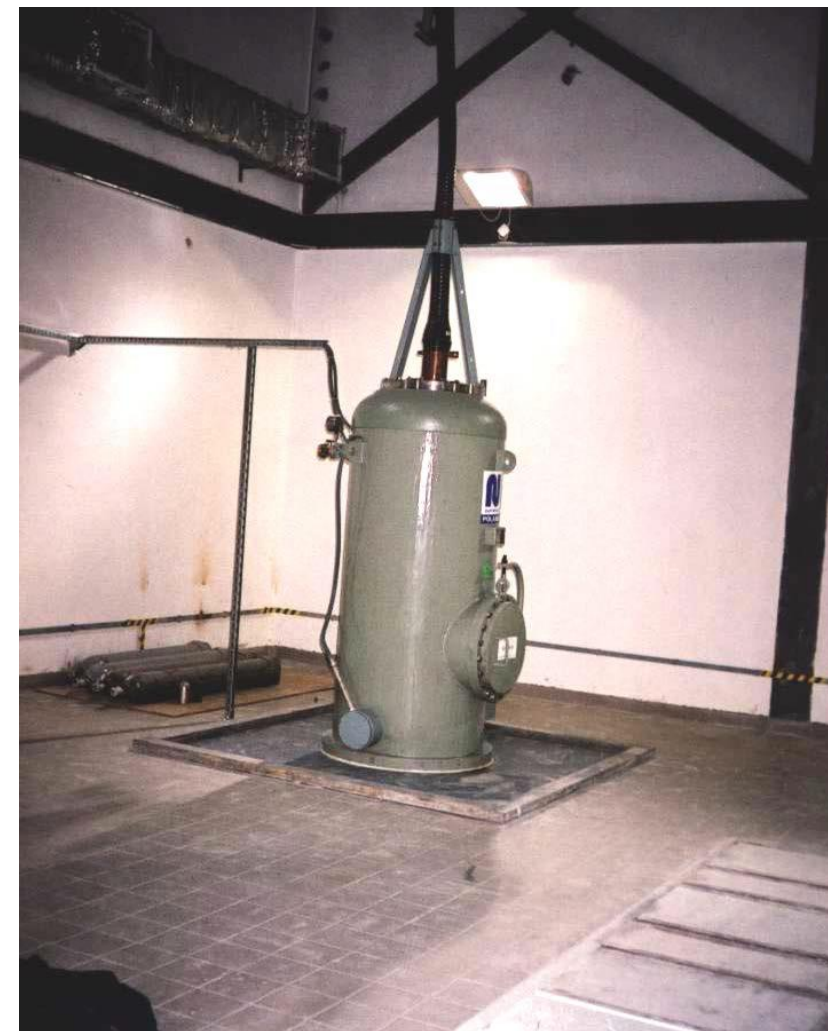
Instalacja Oczyszczania Spalin w Elektrowni Pomorżany 270 tys Nm<sup>3</sup>/h



## Установка по очистке – общий вид



Electron beam plant –common view



Ускоритель электронов



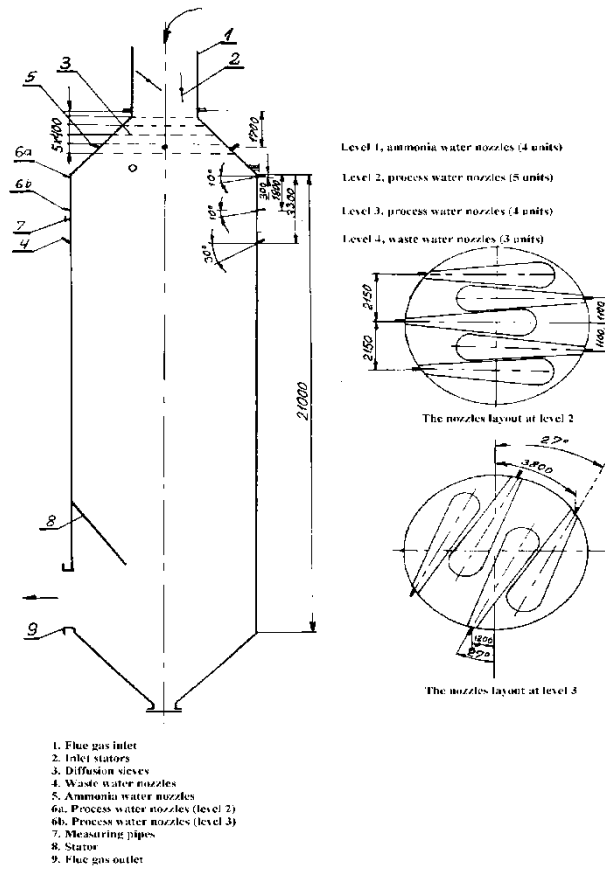
## Контрольный пульт установки ЭЛОУГ





Если на входе температура дымовых газов низка, влажность может быть слишком низкой для надлежащего хода процесса. В этом случае есть возможность увеличения этого параметра путем добавления пара над газоотводом из градирни.

## Газовая градирня (башенный охладитель газов)





**Емкости для хранения аммиака и аммиачной воды**

- Аммиак, основной реагент процесса, хранится в виде аммиачной воды и может быть подаваться в установку двумя способами:
  - Вариант I - Газообразный аммиак после испарения может быть введен перед камерой облучения;
  - Вариант II - Аммиачную воду можно распылять прямо в охладитель с помощью отдельной системы сопел.
- Аммиак может также впрыскиваться как в виде аммиачной воды для распыления в охладителе, так и в виде газообразного аммиака перед камерой облучения (смешанный вариант).
- Способ введения аммиака влияет на эффективность удаления загрязняющих веществ, особенно SO<sub>2</sub>. В зависимости от условий процесса потребление аммиачной воды находится в диапазоне 150-600 кг / ч.



# Реактор

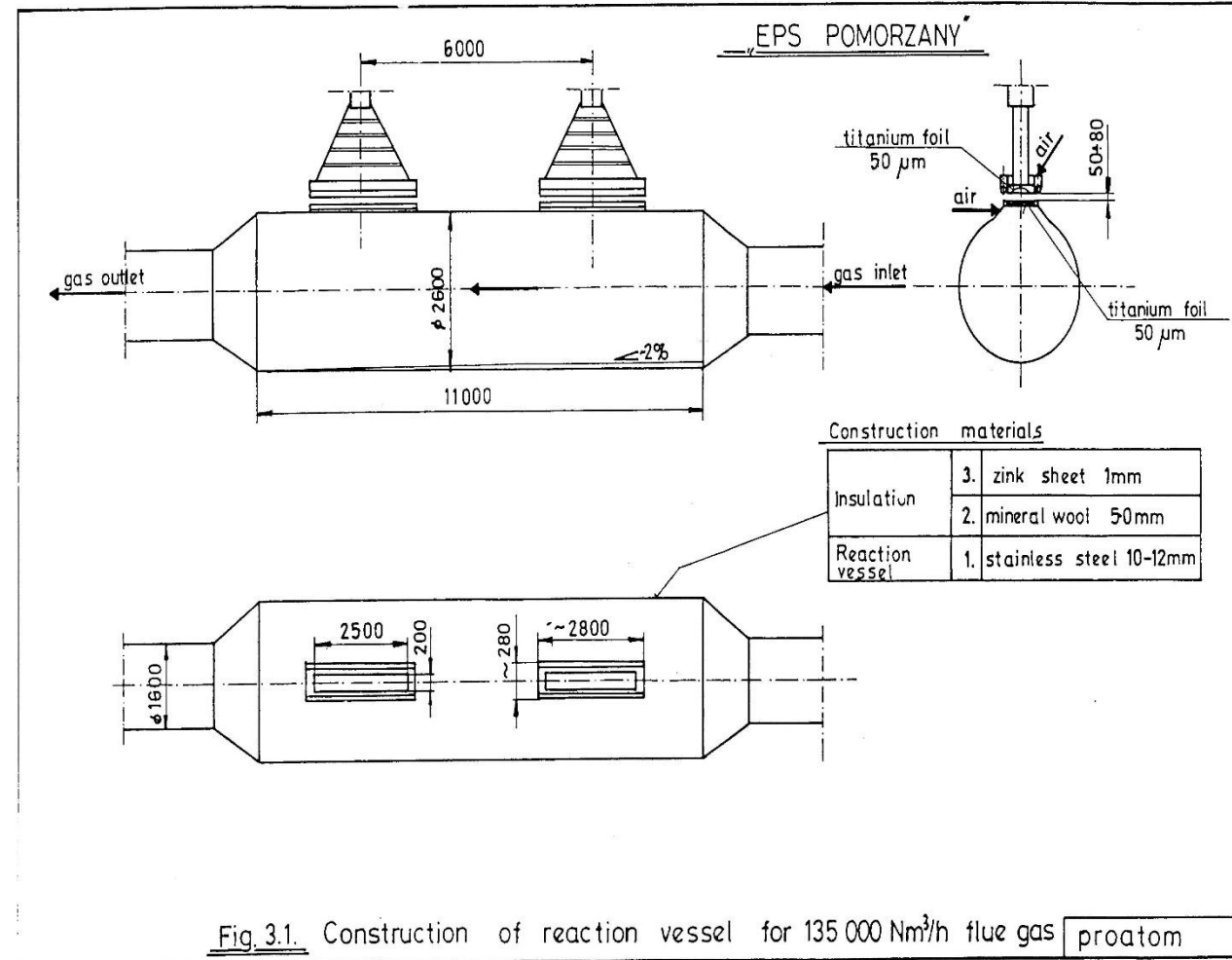


Fig. 3.1. Construction of reaction vessel for 135 000 Nm<sup>3</sup>/h flue gas proatom



## Электрофильтры

- Побочный продукт в виде аэрозоля собирается в электрофильтре, и после гранулирования поступает для производства удобрений. Побочным продуктом в основном являются сульфат аммония и нитрат аммония.
- Помимо них, образуются хлорид аммония и другие примеси, как фторид аммония, нерастворимые части (остаточная летучая зола и ржавчина) и т.д.
- Содержание примесей в получаемых удобрениях (особенно тяжелые металлы) значительно ниже действующих стандартов, поэтому побочный продукт имеет очень хорошее качество для сельскохозяйственного применения.
- Выход побочного продукта до 300 кг / час.



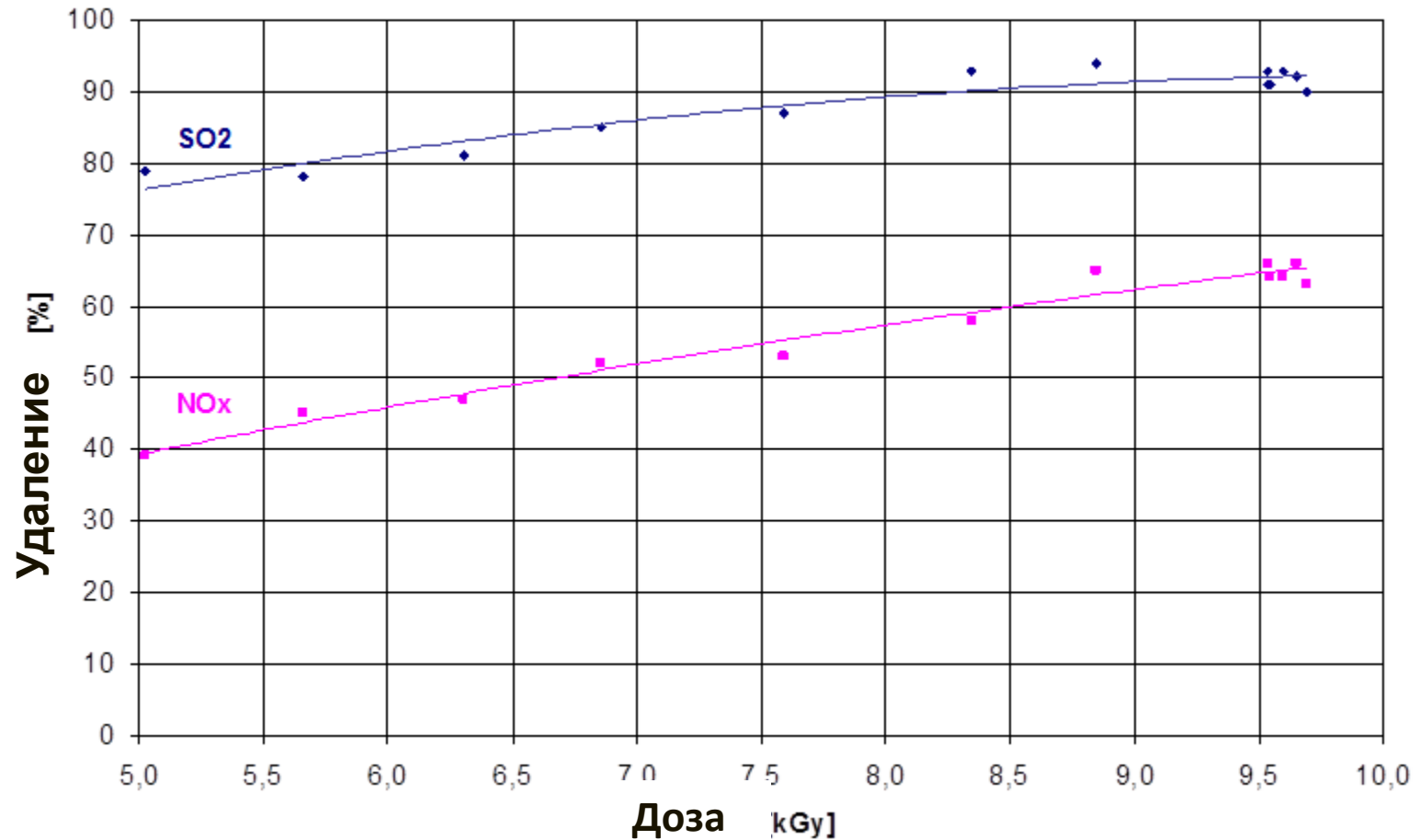
- Топочные газы после очистки смешивают с неочищенной частью газов и выбрасываются в трубу.
- Температура газа после перемешивания превышает  $110^{\circ}\text{C}$ , что позволяет избежать проблем конденсации на стенках трубы.

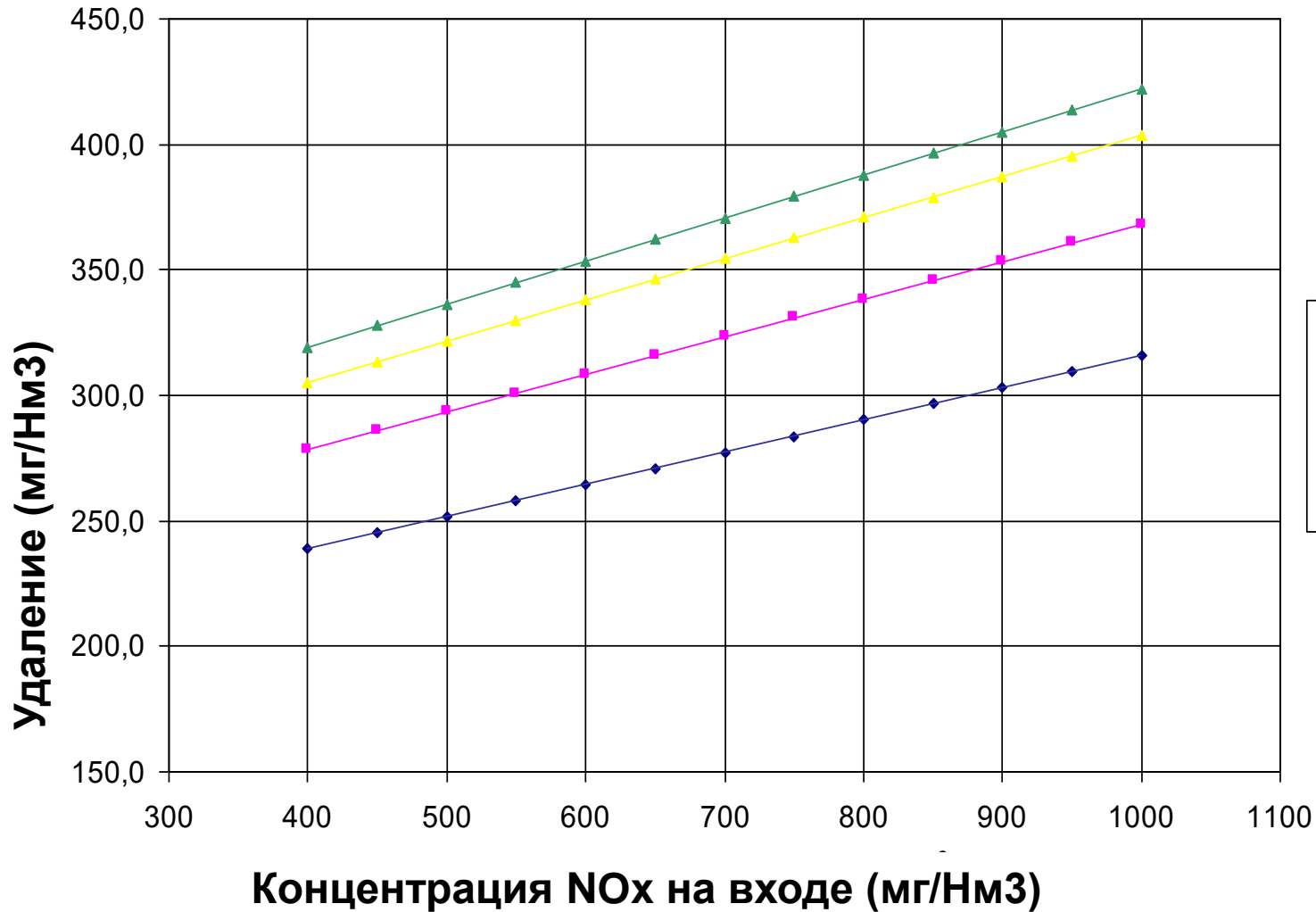




## Зависимость эффективности удаления $\text{SO}_2$ и $\text{NO}_x$ от дозы

- При малых дозах наблюдается практически линейная зависимость эффективности очистки от дозы, при дозах облучения 20—30 кДж/кг эффективность стабилизируется на уровне 95-98 %
- Эффективность очистки в зависимости от дозы облучения: 1- от  $\text{NO}_2$ ; 2 – от  $\text{NO}$





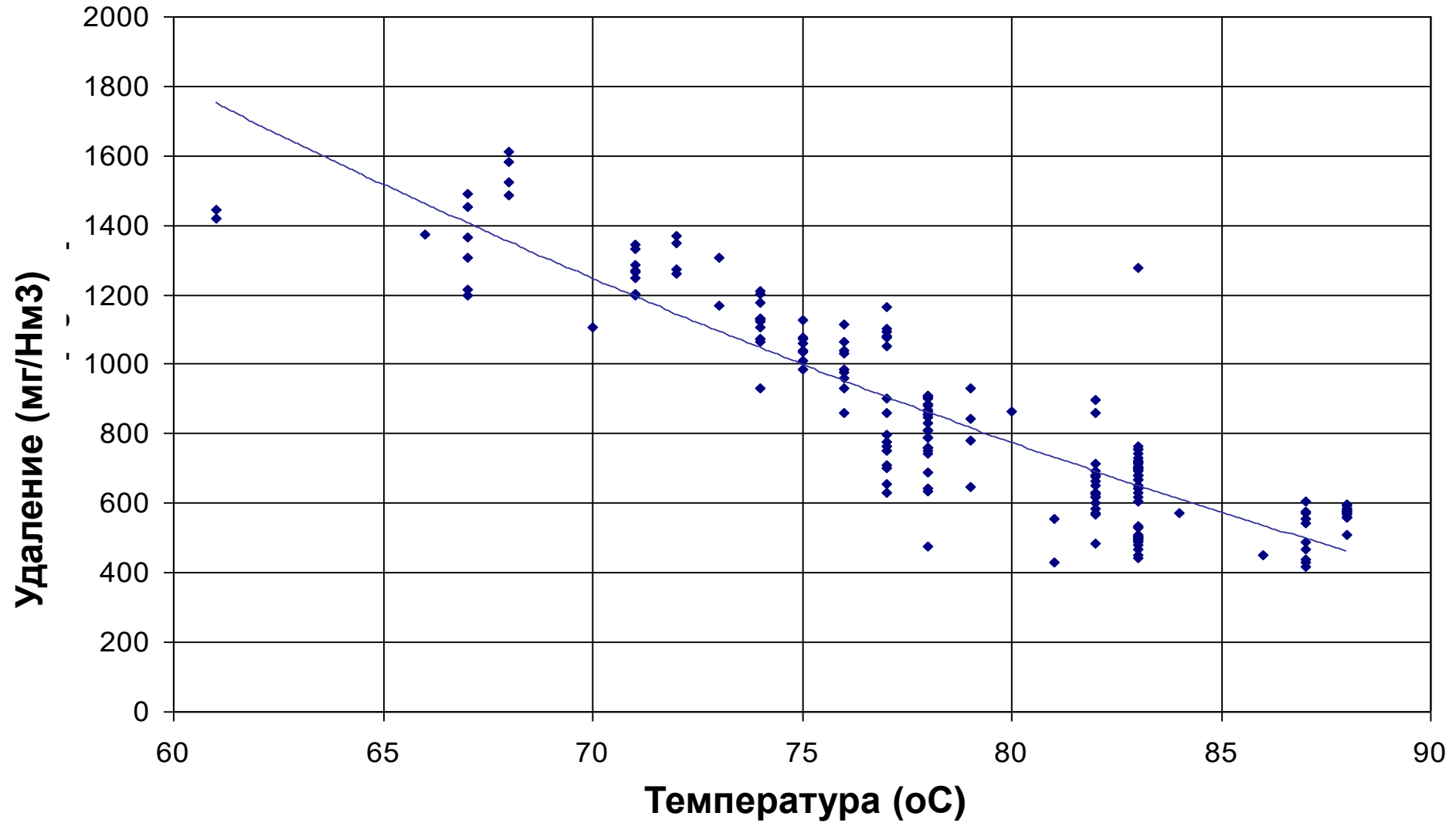
**Зависимость удаления NO<sub>x</sub> от концентрации на впуске,  $\alpha = 0,5$**

С ростом дозы облучения:

- непрерывно падает содержание в очищенном газе NO;
- концентрация N<sub>2</sub>O проходит через максимум;
- содержание диоксида азота непрерывно возрастает.

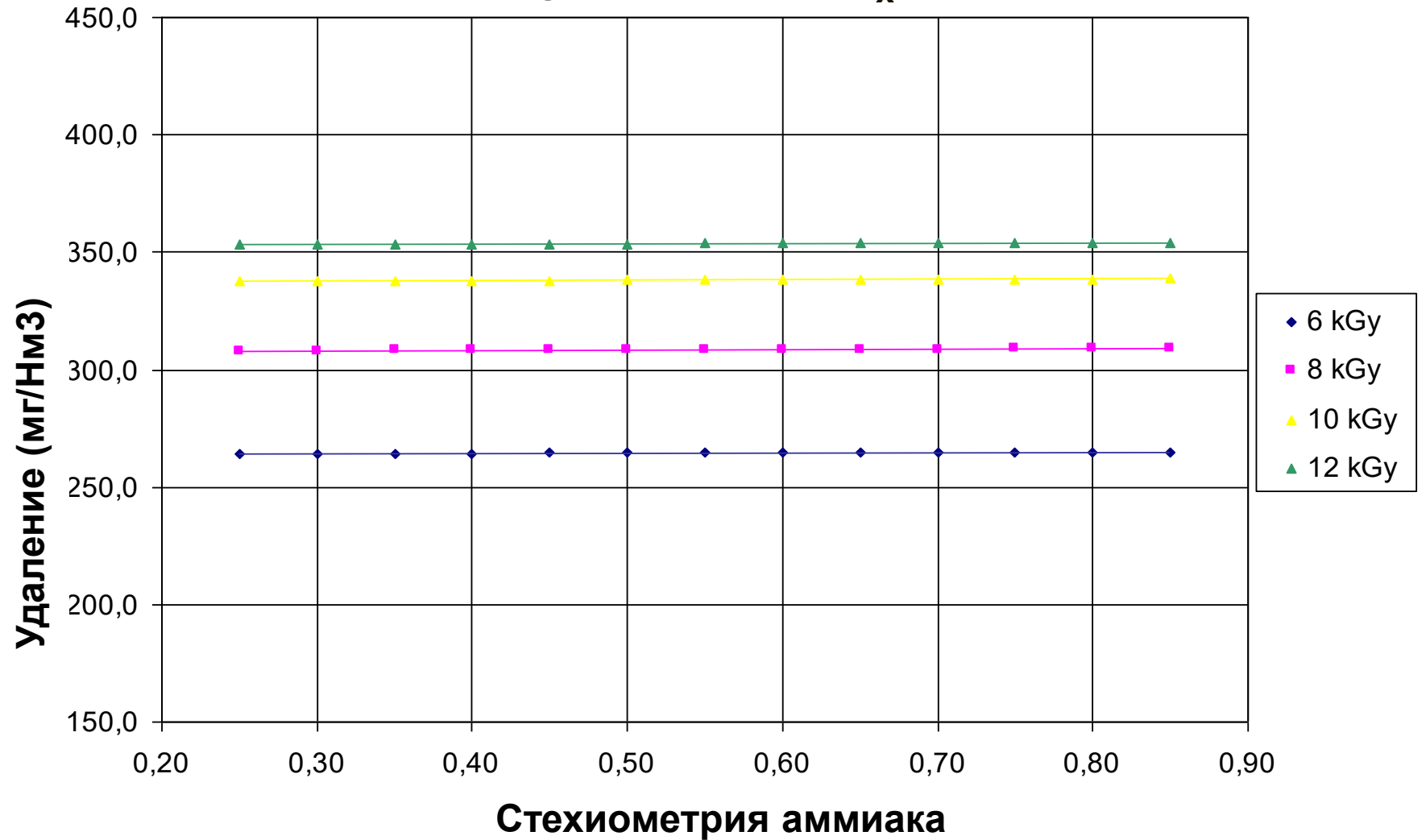


## Зависимость удаления SO<sub>2</sub> от температуры



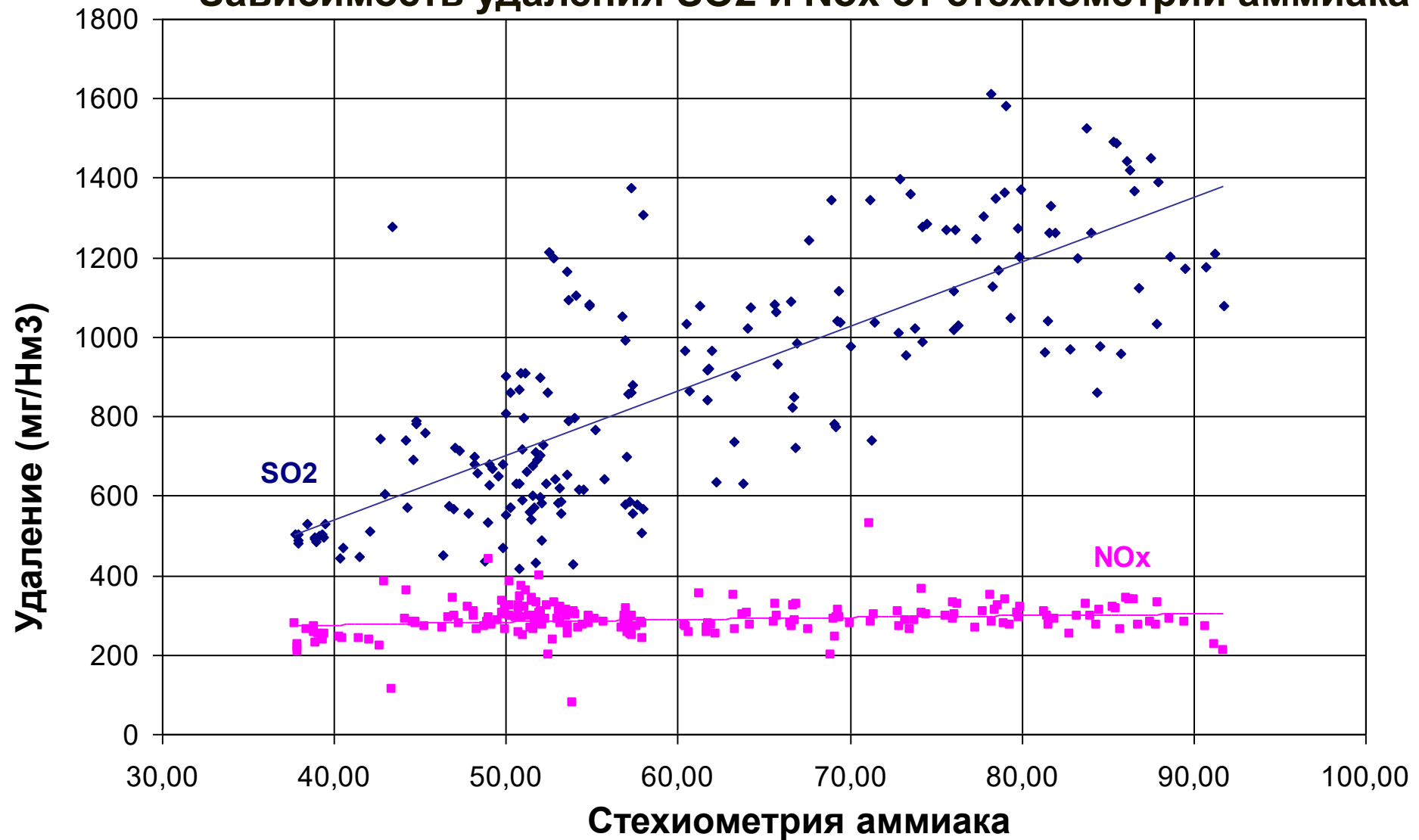


## Зависимость удаления $\text{NO}_x$ от стехиометрии аммиака



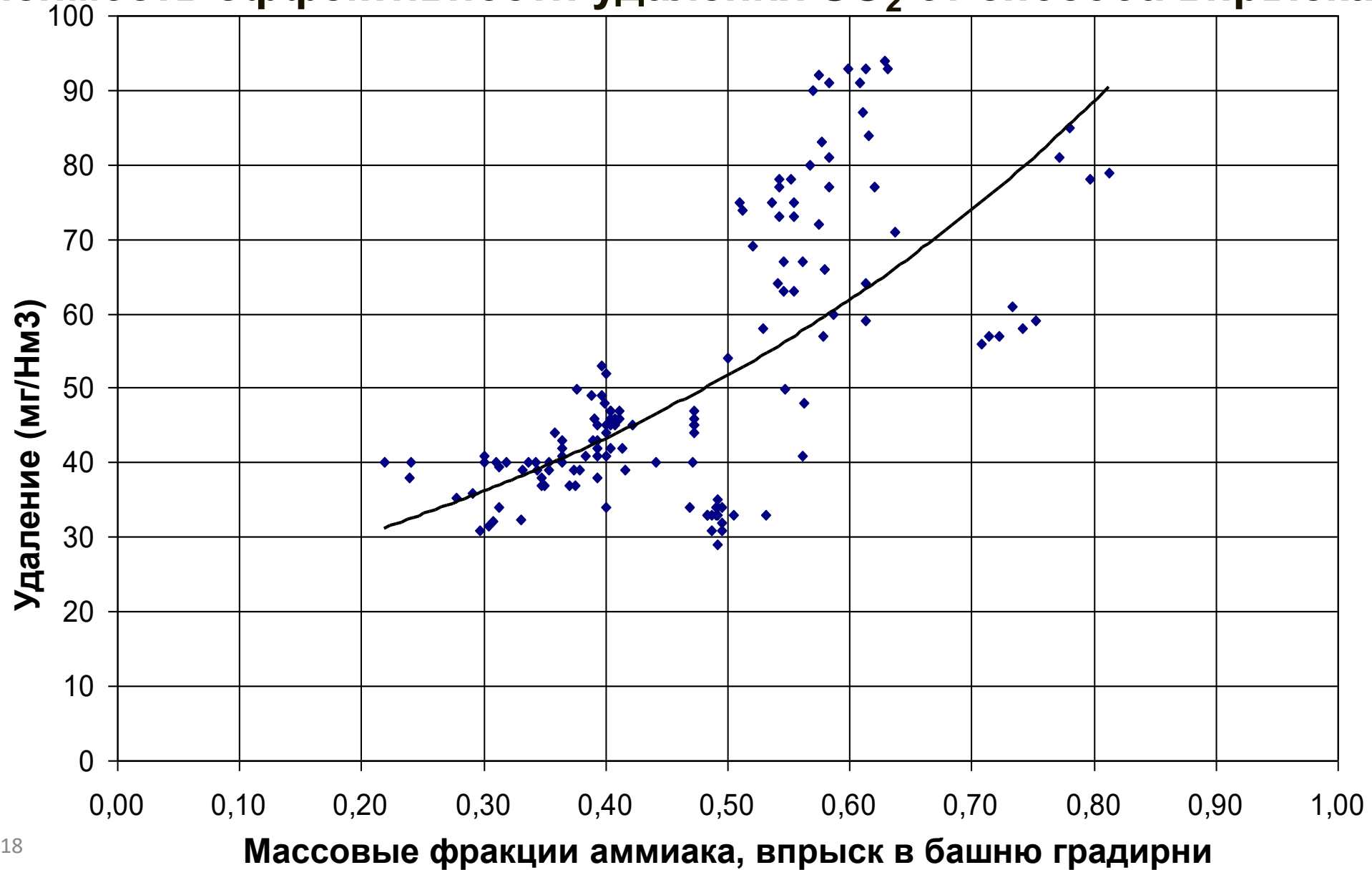


### Зависимость удаления SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> от стехиометрии аммиака





## Зависимость эффективности удаления $\text{SO}_2$ от способа впрыска аммиака





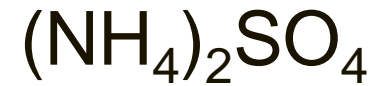
## Цех по расфасовке минеральных удобрений



Коммерческий продукт – смешанные минеральные удобрения



## Состав побочного продукта



45-60%



22 - 30%



10 - 20%

Влага

0,4 - 1%

Водонерастворимые частицы 0,5 - 2%





## Концентрации тяжелых металлов в побочном продукте (частей на миллион)

Металл	Pb Свинец	Cd Кадмий	Hg Ртуть	As Мышьяк
Пилотная установка ТЭС Kawęczyn	< 5	0.5 ÷ 0.6	0.02 ÷ 0.05	0.25 ÷ 0.39
Макс. ПДК (Польский стандарт)	140	140	2	50



- В настоящее время центрами внедрения технологии являются Евросоюз, Канада и Китай.
- Работы ведутся под патронатом МАГATЭ, где действует специальный комитет по внедрению электронно-лучевого процесса.
- МАГATЭ рассматривает электронно-лучевую технологию как единственный перспективный способ очистки отходящих газов, который позволяет развивать угольную энергетику, соблюдая, при этом, режим нераспространения.



## Экономическая перспектива и эффективность установки

- Стоимость установки для ТЭС Pomorzany составила \$ 20 млн.
- При оснащении электрических станций электронно-лучевой очисткой капитальные затраты составят порядка 0,58\$/Вт, что в два раза ниже, чем при использовании химических методов.
- КПД удаления загрязняющих веществ на промышленной установке может достигать 95% для SO<sub>2</sub> и 70% для NO<sub>x</sub>. Такие результаты были получены при низких температурах (При 70 ° C) и высокой влажности дымовых газов.
- В процессе очистки получают минеральные удобрения, доходы от реализации которых в четыре раза выше затрат на исходные реагенты. Каждые 100 МВт могут приносить до 1,3 млрд тенге в год при средних содержаниях окислов серы в отходящих газах и до 3,9 млрд тенге в год при больших содержаниях окислов серы.
- Общий годовой объем поступающих от продажи удобрений средств - 1,4 млрд. \$.

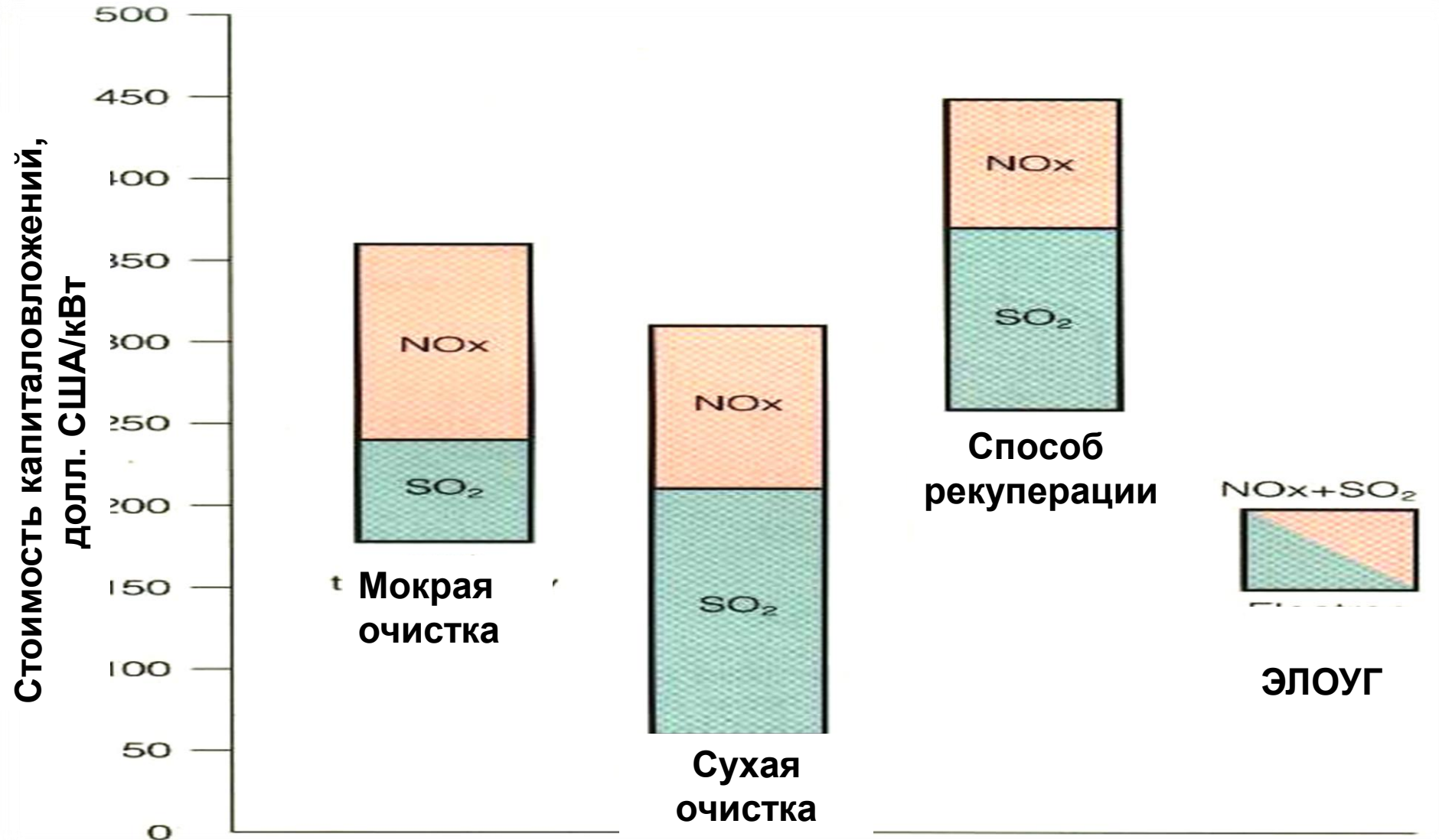


## Экономическая перспектива и эффективность установки

- Капиталовложения в электронно-лучевую очистку в два раза ниже, чем в химические методы, эксплуатационные затраты составляют от 0,2% до 2% установленной мощности котла.
- Это позволяет обеспечить окупаемость очистки за 3-4 года эксплуатации.
- Каждые 100 МВт могут приносить до 250 миллионов рублей в год при средних содержаниях окислов серы в отходящих газах и до 750 миллионов рублей в год при больших содержаниях окислов серы.  
Рынок таких систем очистки из расчета капиталовложений 1 250 миллионов рублей на 100 МВт установленной мощности.
- Одновременно происходит комплексная очистка от окислов азота, серы, метана, сероводорода, соляной кислоты, ароматических углеводородов.

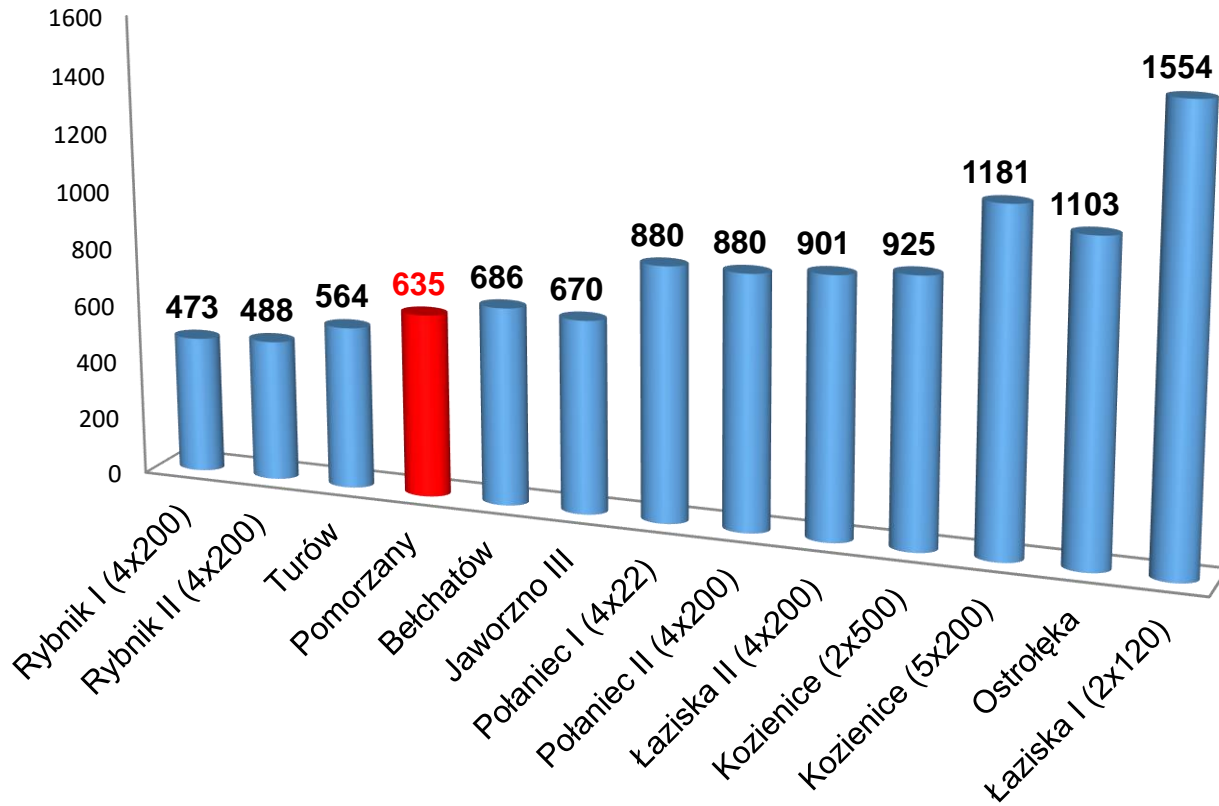


Сравнение инвестиционных затрат по электронно-лучевой и традиционной технологии

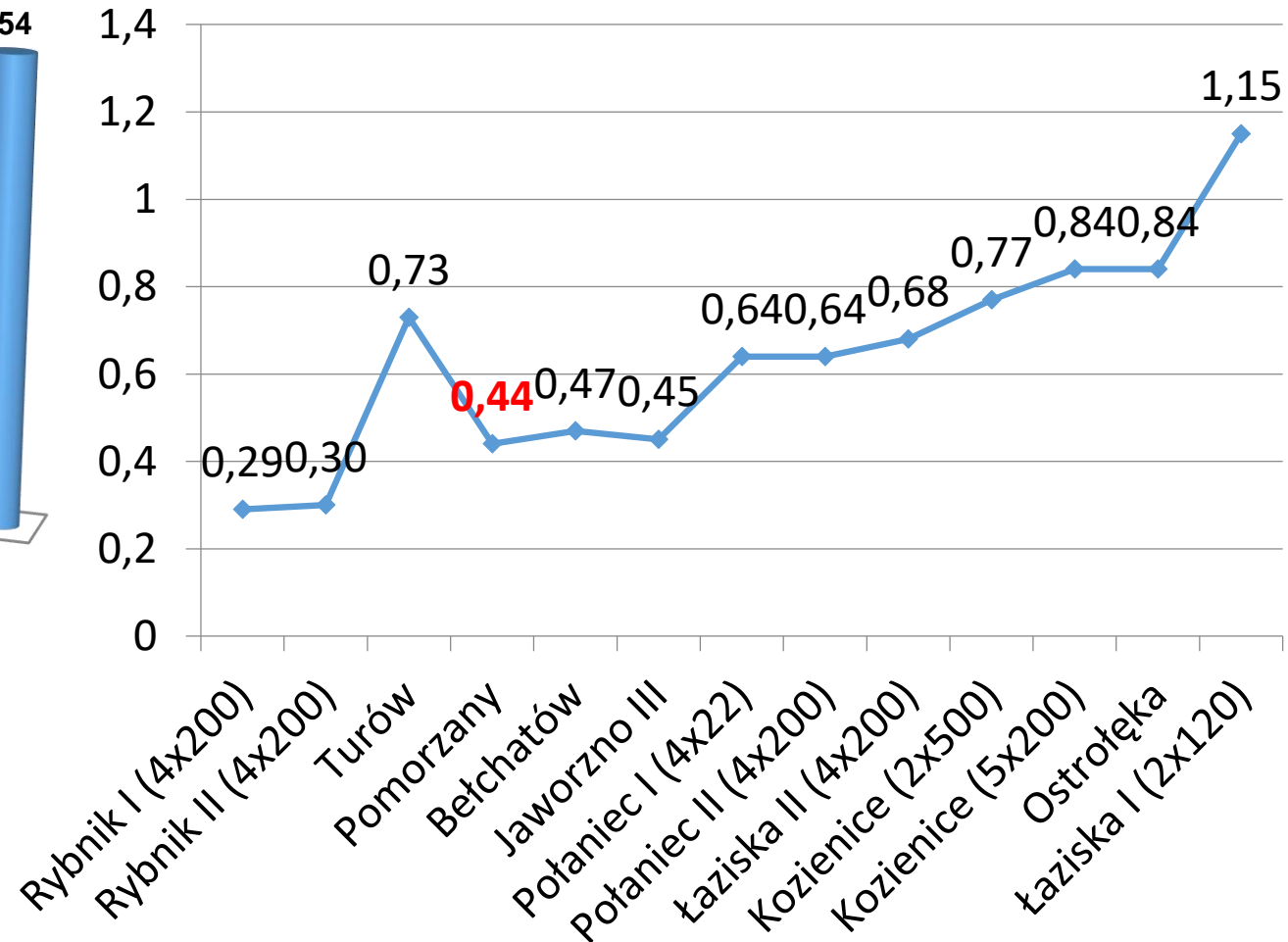


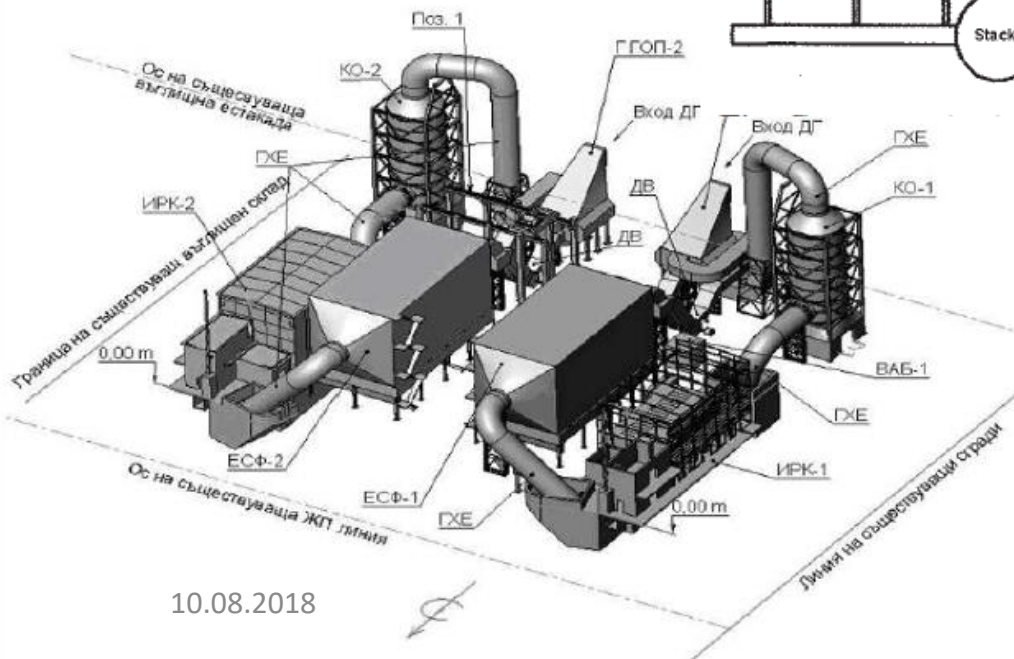
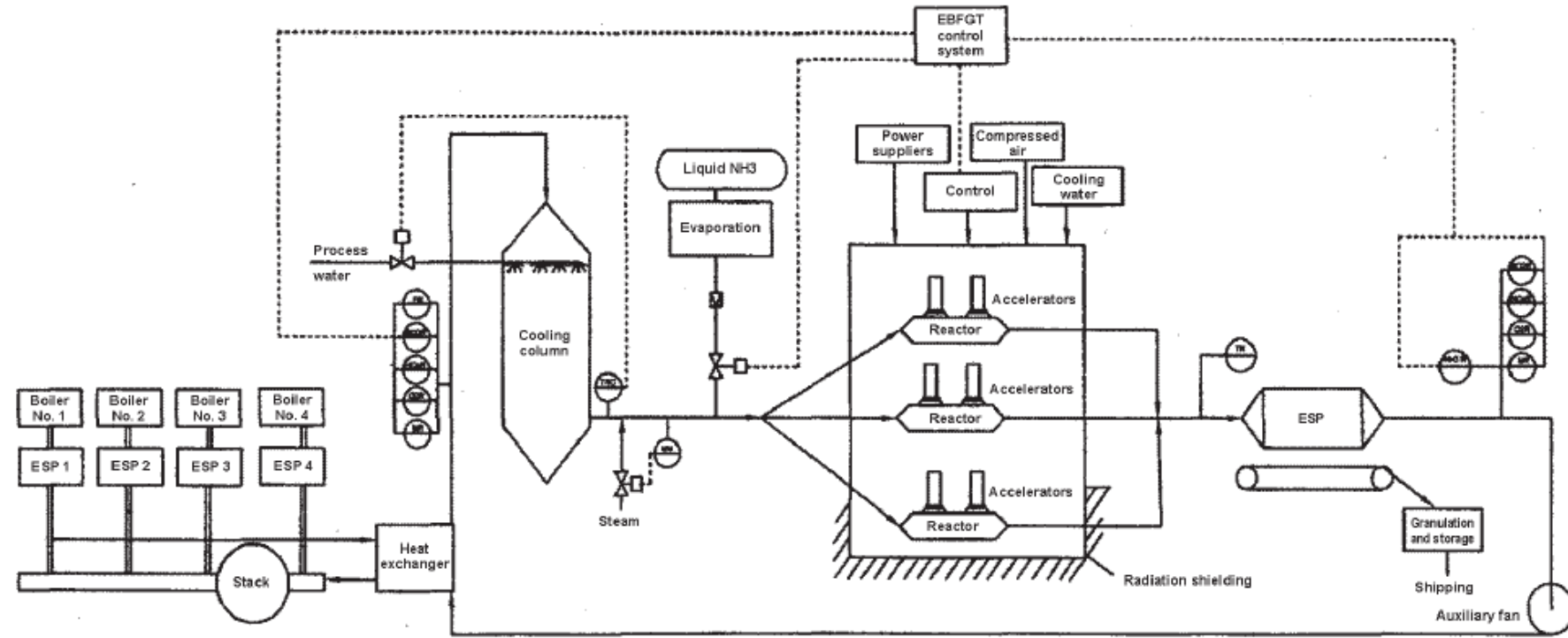


## Повышение стоимости производства электроэнергии (долл.США/кВт-ч)



## Стоимость удаления 1 мг SO2 из дымовых газов (долл.США/мг SO2)





**Общий вид установки**  
(в цепь к двум ускорителям будет подключен третий ускоритель).



## Заключение

- Внедрение электронно-лучевой очистки в нашей стране позволит дать дешевые удобрения для сельского хозяйства и эффективно решить проблему дефицита продовольствия.
- Создание эффективной газоочистки – ключ к перевооружению и дальнейшему развитию отечественной промышленности и энергетики.
- Электронно-лучевая технология очистки отходящих газов кардинально меняет ситуацию. Газоочистка становится прибыльной отраслью народного хозяйства.