

Национальная академия наук Украины  
Институт газа

*Сигал И.Я., Смихула А.В.*

**«Технологии снижения выброса оксидов азота  
котлами мощных котельных и ТЭЦ».**

*Докладчик: д.т.н., проф. Сигал И.Я.*

**Одесса 2016**



# Ориентировочная экономия природного газа и снижения NOx по предлагаемым Институтом газа НАНУ технологиям модернизации котлов в городах Украины

Тип котла	Годичная экономия природного газа на 1 котел			Количество котлов	Годичная экономия всеми котлами		Окупаемость	Возможное снижение выброса NOx, %
	%	тыс. м <sup>3</sup> /год	тыс. грн./год*		млн. м <sup>3</sup> /год	млн. грн./год*		
ТВГ-8*** ТВГ-8М КВГ-6,5***	4,3	170,3	1171,5	2000	340,6	2343,0	1 год	50
ДЕ-10 ДЕ-16*** ДЕ-25	5**	216,0	1485,9	120	25,92	178,3	1 год	40
ДКВР-4 ДКВР-6,5 ДКВР-10 ДКВР-20	4**	100,8	693,4	1100	110,88	762,7	1,2 года	50
ПТВМ-30	3	410,4	2823,1	120	49,248	338,8	1 год	50
ПТВМ-50*** ПТВМ-100 ПТВМ-180	5	1620	11144,0	40	64,8	445,8	меньше 1 года	60
КВГМ-50 КВГМ-100 КВГМ-180	5	1800	12382,2	50	90	619,1	меньше 1 года	60
Котлы городских ТЭЦ: на газе на угле	3 -	1500 -	10318,5 -	20 -	30 -	206,4 -	меньше 1 года	60 30
<b>Всего по котлам:</b>				<b>3450</b>	<b>711,4</b>	<b>4894,1</b>	<b>≈ 1 год</b>	

\* При цене природного газа 6879 грн. за 1000 м<sup>3</sup>.

\*\* В экономии топлива учитывать перерасход топлива в осенне-весенний период.

\*\*\* Проверено на испытываемых котлах.



Малозатратные технологии, которые можно осуществить при ремонтах котлов (модернизации котлов, горелок), позволят:

- сэкономить ежегодно до 1 млрд. м<sup>3</sup> природного газа;
- снизить выбросы в атмосферу оксидов азота до европейских норм;
- продлить ресурс 70-80 % котлов на 10-15 лет.



**Выбросы основных загрязняющих веществ от объектов энергетики и нормы согласно новой директивы 2010/75/ЕС которая входит в Договор Украины и ЕС об Ассоциации, с указанием возможности их выполнения**

Загрязняющее вещество	Нормативы по директиве ЕС 2010/75/ЕС, мг/нм <sup>3</sup>	Показатели ТЭС Украины, мг/нм <sup>3</sup>		Превышение над директивой, разы	Возможность приведения к 2018 в соответствие
<b>Работа ТЭС/ТЭЦ от 500 МВт (тепловых) на твердом топливе, O<sub>2</sub>=6 %</b>					
Твёрдые частички	20	скруббер	<b>1500-4000</b>	75-200	ВОЗМОЖНО
		эл. фильтр	<b>350-1000</b>	17-50	ВОЗМОЖНО
SO <sub>x</sub>	200	<b>800 – 9000</b>		4-45	ВОЗМОЖНО частично
NO <sub>x</sub>	200	<b>500 – 1600</b>		2,5-8	ВОЗМОЖНО частично
<b>Работа ТЭС/ТЭЦ, котельных от 50 МВт на природном газе, O<sub>2</sub>=3 %</b>					
<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>100</b>	<b>200 – 400</b>		<b>2-4</b>	<b>ВОЗМОЖНО</b>

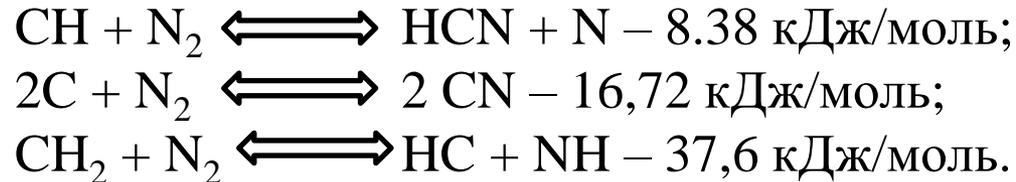


## 1. Образование «термических» оксидов азота



## 2. Образование «быстрых» $\text{NO}_x$

Быстрое образование NO объясняется связыванием молекул азота радикалами CH, CH<sub>2</sub> и CN в реакциях с очень малыми энергетическими затратами:



Образование NO по «быстрому» механизму ограничивает минимальную возможность снижения NO в процессах сжигания топлив.

3. Образование «топливных» оксидов азота через CNH, CN, NH<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, NH.

4. Образование NO через N<sub>2</sub>O при сравнительно низких температурах и бедных смесях.



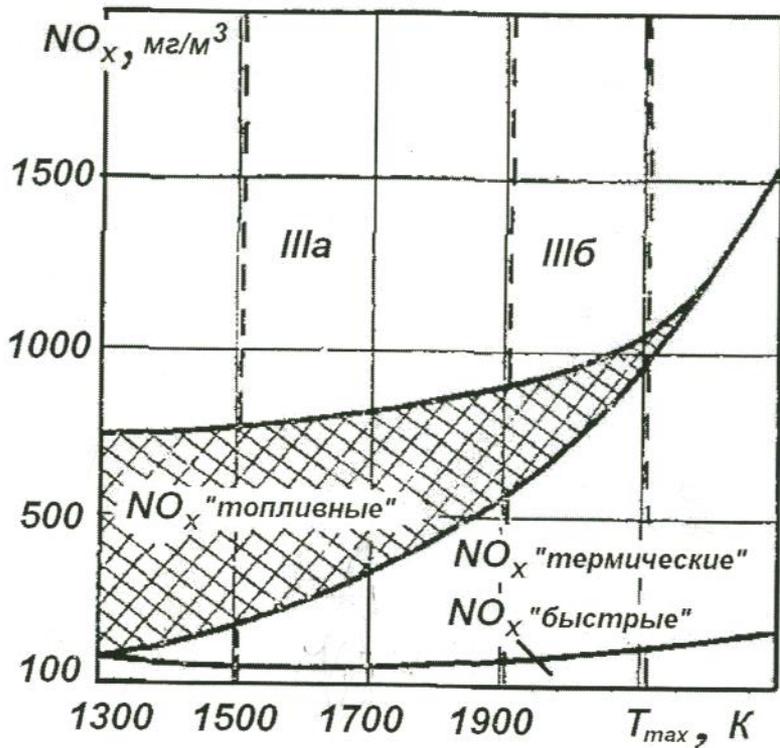


Схема образования  $\text{NO}_x$  при температурах в котлах электростанций и промышленных топочных устройствах,

III а – бурый уголь и другие низкосортные топлива, сжигание в КС;

III б – каменный уголь, мазут и природный газ.

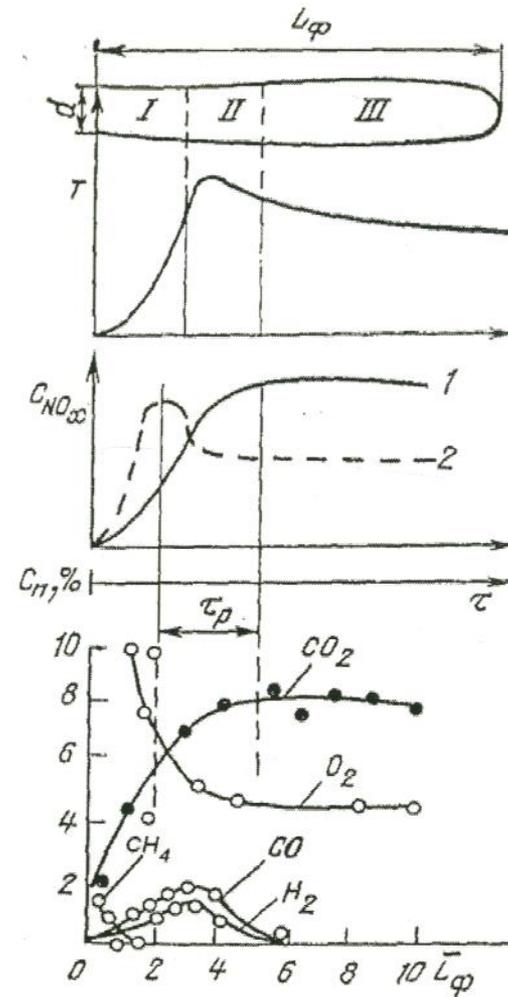


Схема образования оксидов азота в факеле:

1 – «термические»;

2 – «топливные»



**Для определения средней концентрации оксидов азота (в пересчете на диоксид) может быть использована эмпирическая зависимость, полученная И.Я. Сигалом на основании опытов на лабораторных установках и на опытных котлах:**

$$C_{NO_x} = A \cdot d_{\text{э}}^{0,8} \cdot q_T^{0,5} \cdot \alpha_T^3$$

**При наличии мероприятий по снижению суммарная концентрация оксидов азота (в пересчете на диоксид) в первом приближении равна:**

$$C_{NO_x} = A \cdot d_{0,8} \cdot q_T^{0,5} \cdot \alpha_T^3 (1 - K_r \cdot r) (1 - K_{\delta} \delta) \cdot K_{\text{эф}}$$

A – коэффициент пропорциональности (0,17);

$d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр топочной камеры, м;

$q_T$  – тепловое напряжение топочного объема, Гкал/(м<sup>3</sup>·ч);

$\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке (горелке);

r – степень рециркуляции, %;

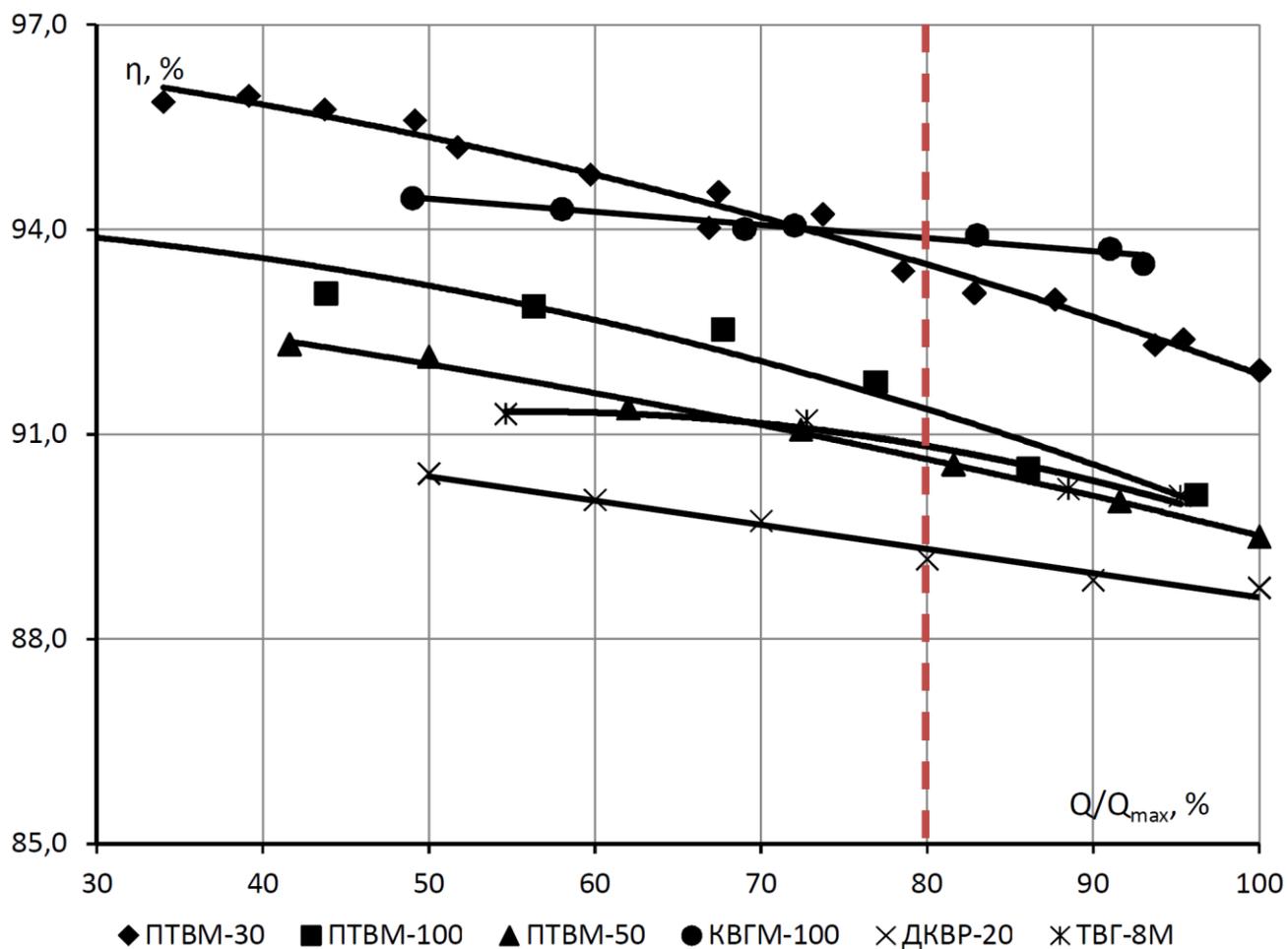
$K_r$  – коэффициент, характеризующий эффективность рециркуляции;

$K_{\delta}$  – коэффициент, характеризующий эффективность ступенчатого горения;

$\delta$  – доля воздуха от общего количества, подаваемого в качестве вторичного, %;

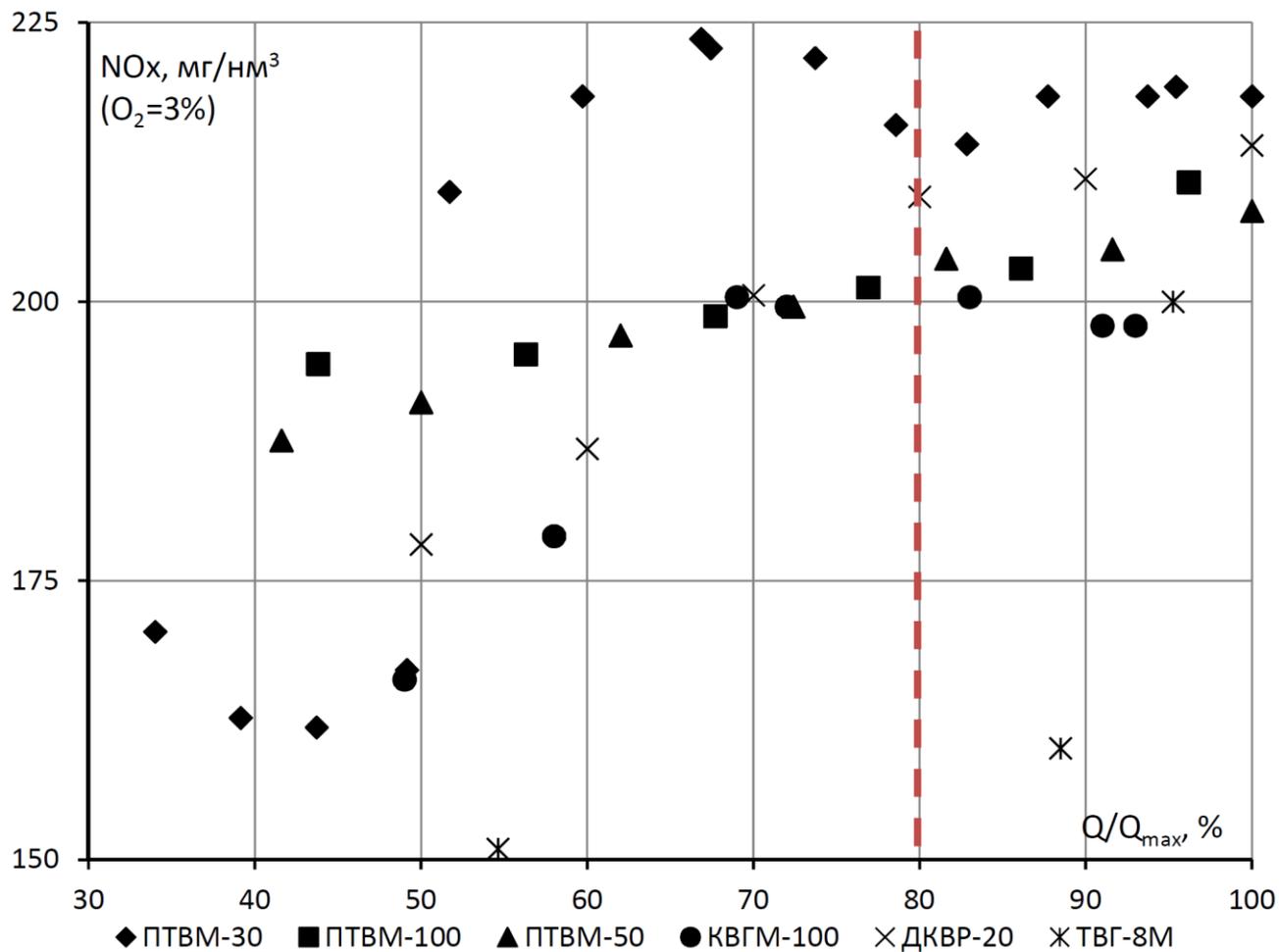
$K_{\text{эф}}$  – коэффициент, учитывающий совместное действие двух или нескольких методов подавления оксидов азота.





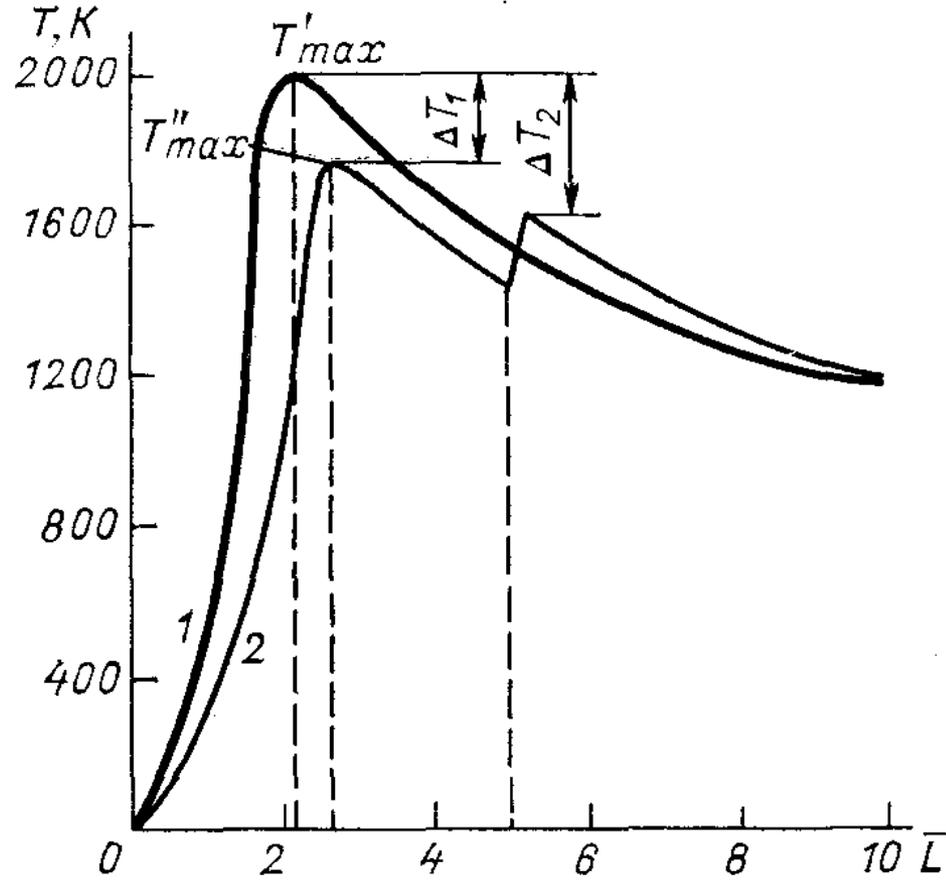
Средний КПД основных типов промышленных и отопительных котлов в зависимости от нагрузки  
(по данным эксплуатации)





Средние показатели по NO<sub>x</sub> основных типов промышленных и отопительных котлов в зависимости от нагрузки (по данным эксплуатации)





Зависимость температур по длине факела при одностадийном (1) и двухстадийном (2) горении.



## Горелки 2-х ступенчатого горения

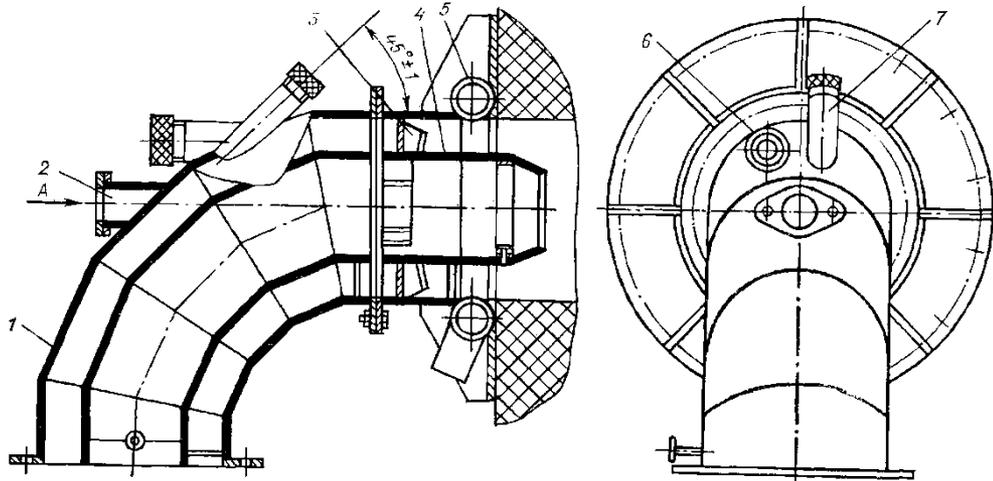
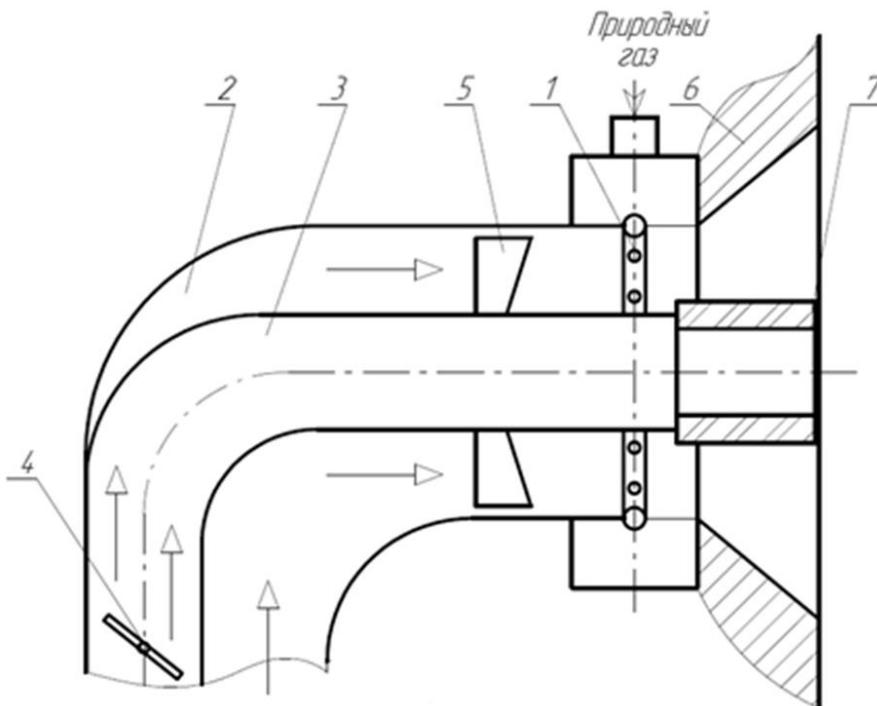


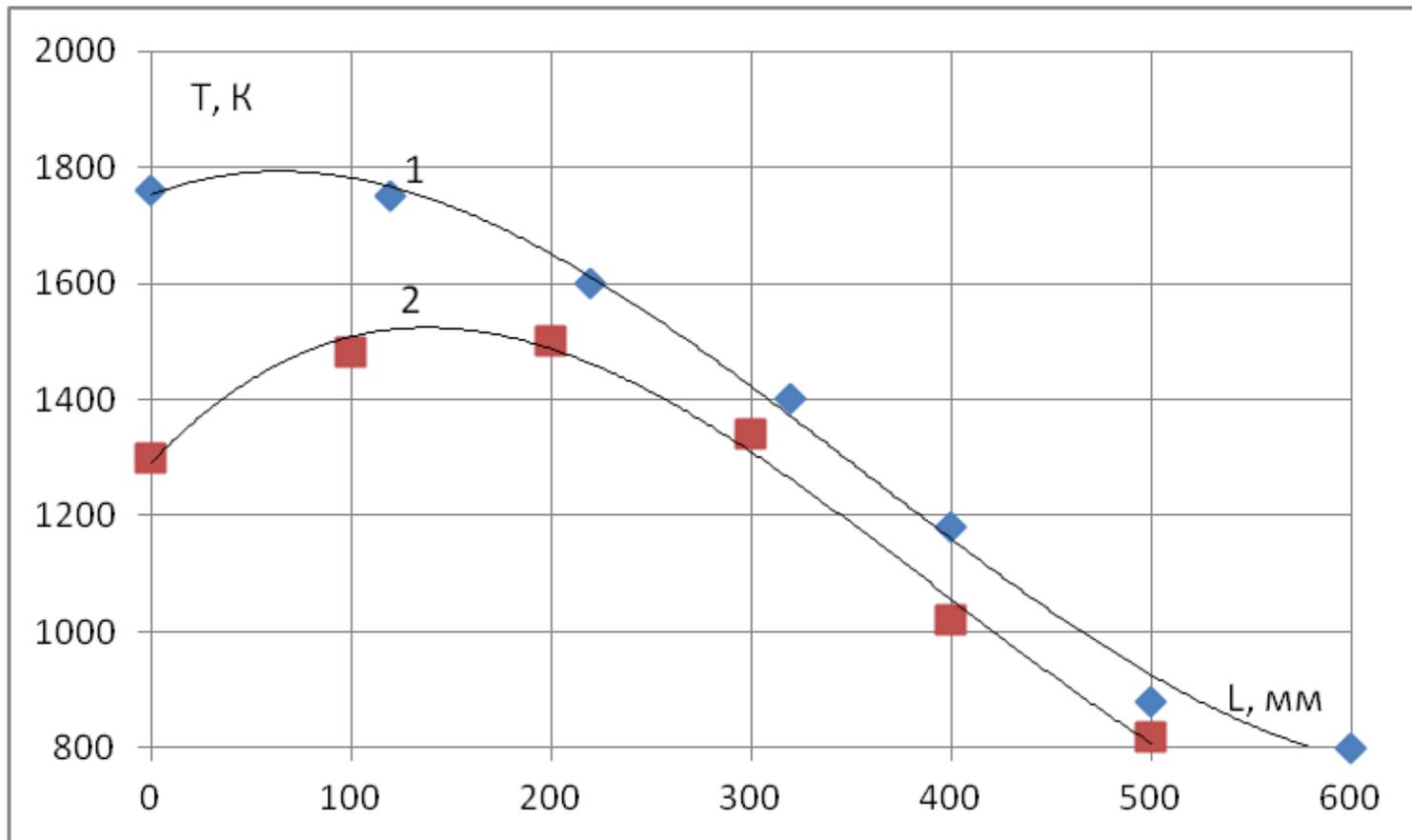
Схема горелочного устройства двухстадийного сжигания природного газа разработанная Институтом газа НАН Украины ГДС-100 (ГДС-50) которые установлены количестве более 2000 шт. в котлах ПТВМ-100, ПТВМ-50.

Разработана и запатентована реконструкция горелок на полное двухступенчатое сжигание природного газа со снижением максимальной температуры в топочной камере типа ГДС-100Р(ГДС-50Р) – позволяет дополнительно уменьшить образование NOx на 20-30%.



1 - коллектор природного газа с газовыми соплами; 2 - патрубок первичного воздуха; 3 - патрубок вторичного воздуха; 4 - шибер для регуляции вторичного воздуха; 5 - лопаточный аппарат для закручивания воздушного потока первичного воздуха; 6 - амбразура горелки; 7 - насадка из огнеупорного материала.





Распределение интегральных температур в поперечных сечениях камеры при тангенциальном (1) и комбинированном (2) подводах воздуха на расстоянии от горелки  $L$



**Суть двухступенчатого сжигания топлива в том, что в первичную зону горения подается воздуха меньше, чем необходимо для полного выгорания топлива, в результате чего снижается максимальная температура  $T_{\phi}$  и содержание кислорода в ядре факела, увеличивается длина факела  $L_{\phi}$  и светимость факела  $a_{\phi}$ , снижается скорость реакций образования  $NO_x$**

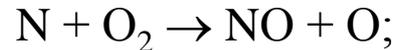
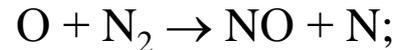
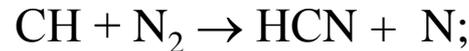
$$L^{\text{дв}}_{\phi} > L_{\phi},$$

$$a^{\text{дв}}_{\phi} > a_{\phi},$$

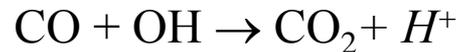
$$\left(\frac{dNO_x}{d\tau}\right)_{\text{дв}} < \left(\frac{dNO_x}{d\tau}\right), \quad (NO_x)_{\text{дв}} < NO_x$$

**Во вторичной зоне горение идет при низшей температуре и  $NO_x$  практически не образуется.**

**При горении метана основные реакции (в первичной зоне):**



**Во вторичной зоне:**



и др.

**Эффективность процесса двухступенчатого горения можно записать в виде:**

$$\eta = \frac{NO_x - NO_x^{\text{дв}}}{NO_x} \cdot 100 = \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha_{II}}{\alpha_I}\right)^3} \right] \cdot 100$$



Реконструкция горелок на полное двухступенчатое сжигание природного газа со  
снижением максимальной температуры в топочной камере  
типа ГДС-100Р(ГДС-50Р)

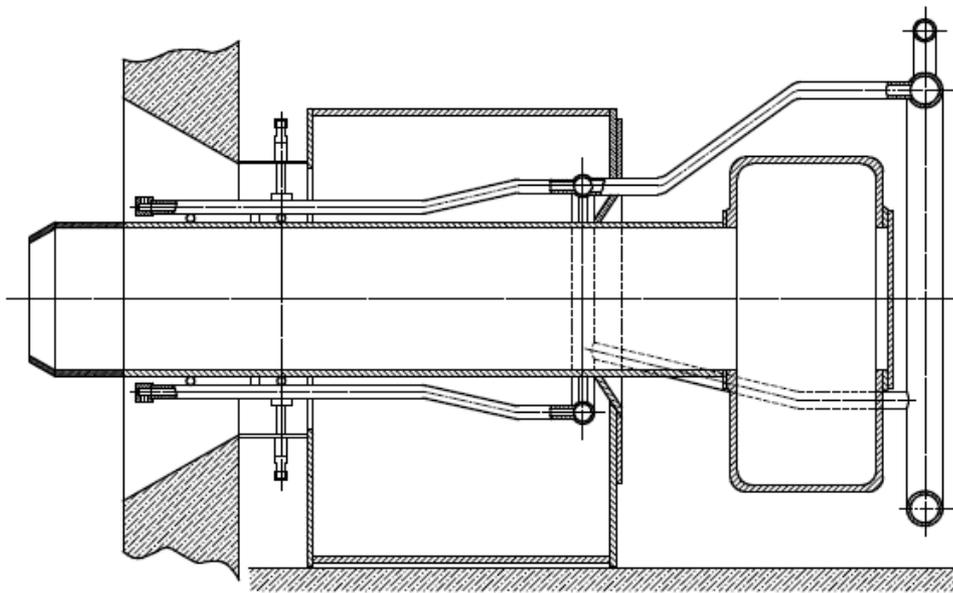
Конструкция горелки	Длина насадка, $l_{\text{вн}}$	Концентрация оксидов азота, $\text{мг/м}^3$ (приведенная к $\alpha = 1,0$ )
Горелка Белгородского котельного завода	0	260-320
Горелка Института газа и БелКЗ 1 <sup>го</sup> поколения	0,2	130-200*
Горелка стадийного сжигания со спец. насадком конструкции Института газа	2,2	100
Горелки ГДС-50, ГДС-100	0,2	150-170**

\*Применены в паровых котлах производительностью 50, 75 и 100 т/ч пара в Украине, России, Сербии, Ираке и др. странах

\*\* В странах СНГ работает около 2000 горелок



# Горелки для котлов ТЭЦ



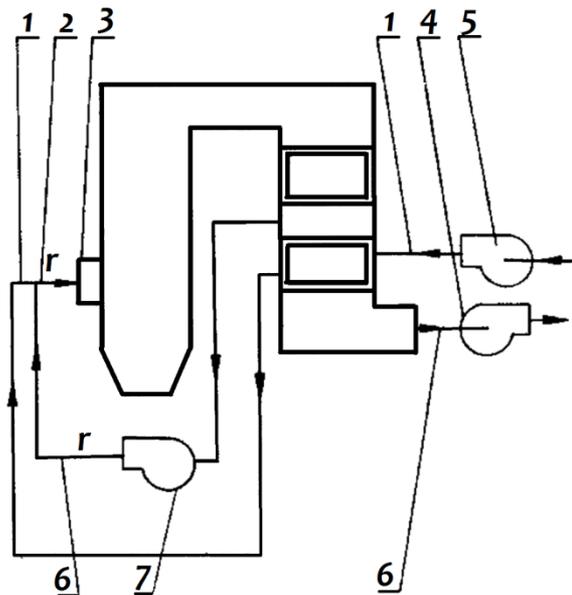
С целью снижения выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) на 45 – 50 % разработано горелочное устройство стадийного сжигания природного газа для реконструкции мощных паровых котлов ТЭЦ типа ТП-170 и др.

Для мощных водогрейных котлов (больше 30 МВт) рекомендуется заменить заводские горелочные устройства на горелочные устройства стадийного сжигания, разработанные Институтом газа НАН Украины, и при необходимости, внедрять рециркуляцию дымовых газов в дуттевой воздух или в топливо.

Преимущество метода стадийного сжигания в том, что оно не влияет на КПД котлоагрегата

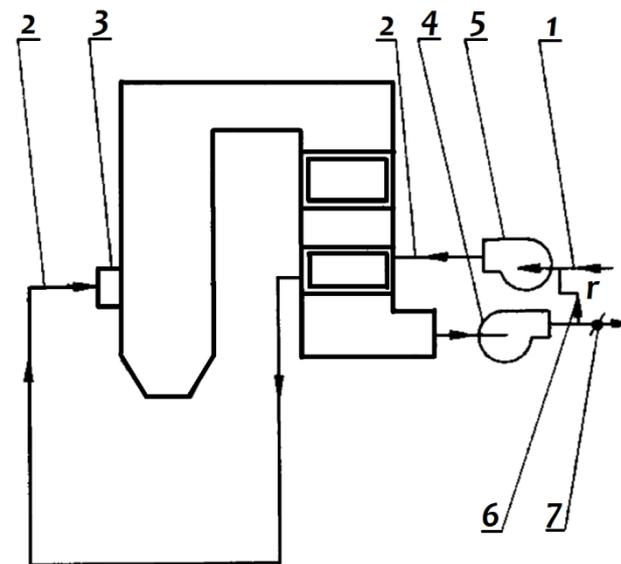


# Рециркуляция продуктов сгорания в котлах



**Способ организации рециркуляции дымовых газов в дуттевом воздухе при помощи рециркуляционного дымососа**

*1 – воздух; 2 – смесь воздуха и дымовых газов; 3 – горелочное устройство;  
4 – дымосос; 5 – вентилятор; 6 – дымовые газы;  
7 – дымосос рециркуляции газов (ДРГ)*



**Способ организации рециркуляции дымовых газов в дуттевом воздухе при помощи саморециркуляции**

*1 – воздух; 2 – смесь воздуха и дымовых газов; 3 – горелочное устройство;  
4 – дымосос; 5 – вентилятор; 6 – дымовые газы; 7 – шибер*



Степень рециркуляции определяется по отношению объема газов рециркуляции до объема дуттового воздуха:

$$\Delta r = \frac{V_r}{V_e}$$

При введении газов рециркуляции, увеличивается объем газов и снижается теоретическая адиабатная и фактическая температура в зоне горения:

$$T_a = \frac{Q_H^p + \alpha_T \cdot L_0 \cdot T_B + V_r \cdot C_r \cdot T_r \cdot 0,01 \cdot r}{V_{cm} \cdot C_{cm} \cdot (1 + 0,01 \cdot r)}$$

Также, при введении газов рециркуляции в дуттовой воздух уменьшается содержание кислорода:

$$C_{O_2} = \frac{0,209 \cdot [(1 + \alpha_T \cdot L_0) + (\alpha_T - 1)L_0 \cdot 0,01 \cdot r]}{(1 + \alpha_T \cdot L_0) \cdot (1 + 0,01 \cdot r)} \cdot 100$$

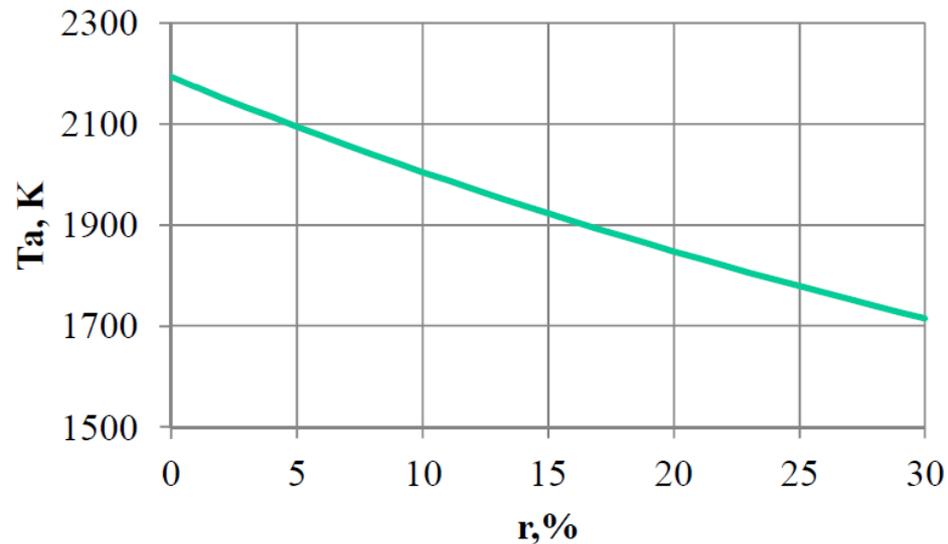


**Установка горелок в котле ПТВМ-30М (треугольником вверх по 3 горелки на боковых стенах)**



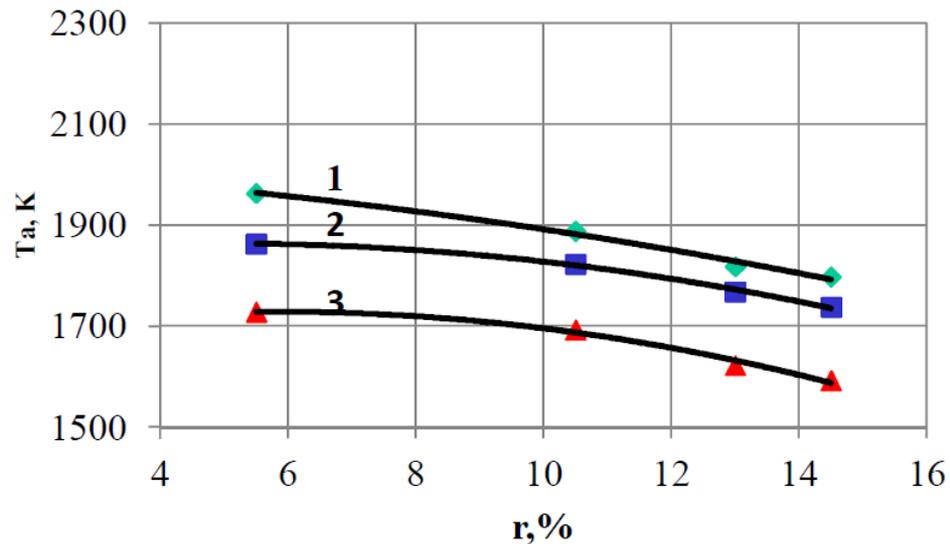
**Установка горелок в котле КВГМ-100 (треугольником вверх 3 горелки на фронте котла)**





Расчетное снижение адиабатной температуры ( $T_a$ ) в топочной камере в зависимости от степени рециркуляции,  $r$ ,

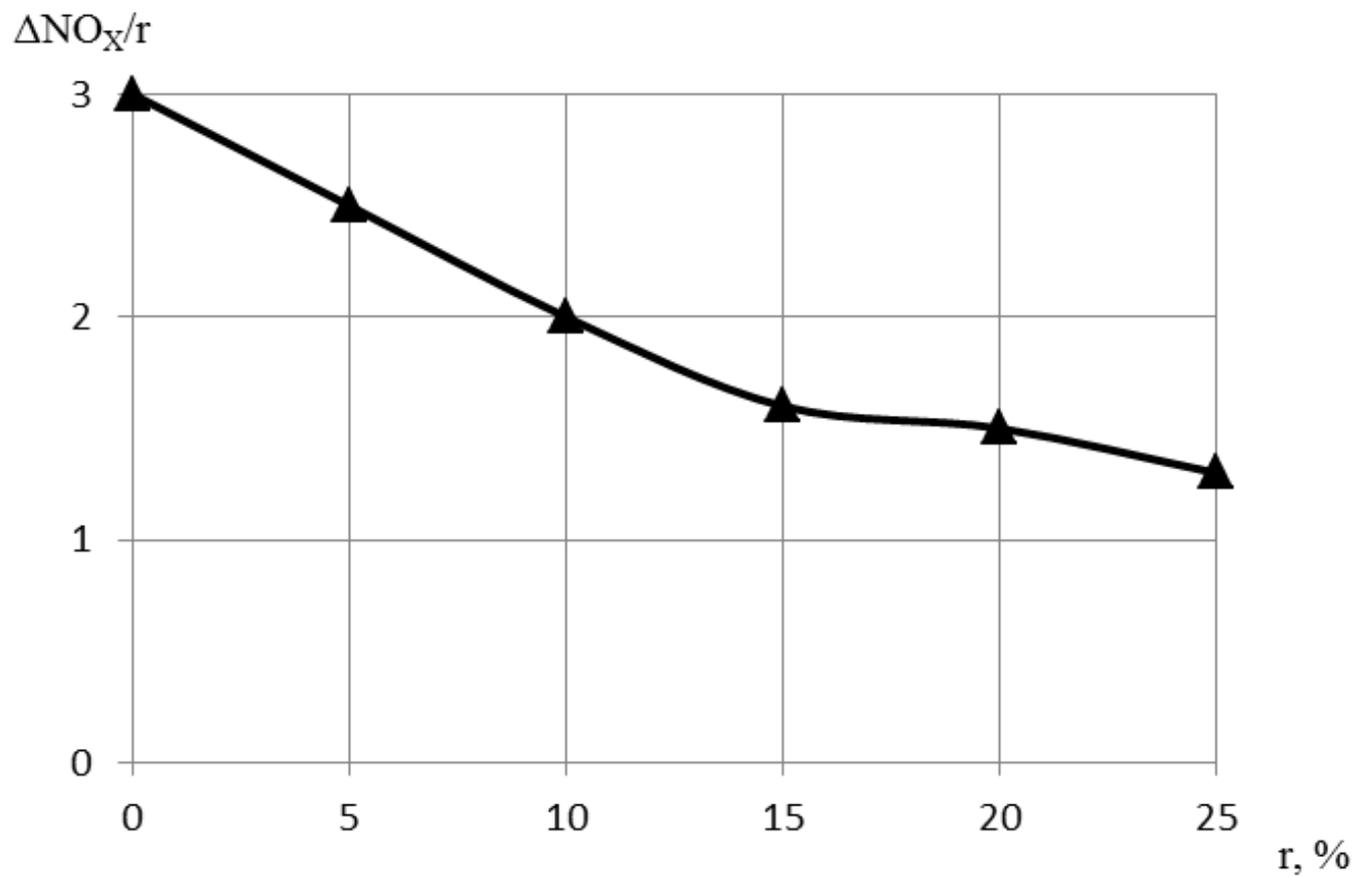
(как топливо взят природный газ из газопровода г.Киева ( $Q_n^p = 36223$  кДж/нм<sup>3</sup>), холодный воздух 273 К, газы рециркуляции 673 К,  $\alpha = 1,05$ ).



Экспериментальное снижение температуры в топочной камере в зависимости от степени рециркуляции,  $r$ , по высоте топочной камеры:

1 – относительная высота точки  $h/H_m = 0,118$ ; 2 –  $h/H_m = 0,225$ ; 3 –  $h/H_m = 0,540$ .





**Интенсивность влияния рециркуляции на образование NO<sub>x</sub>**

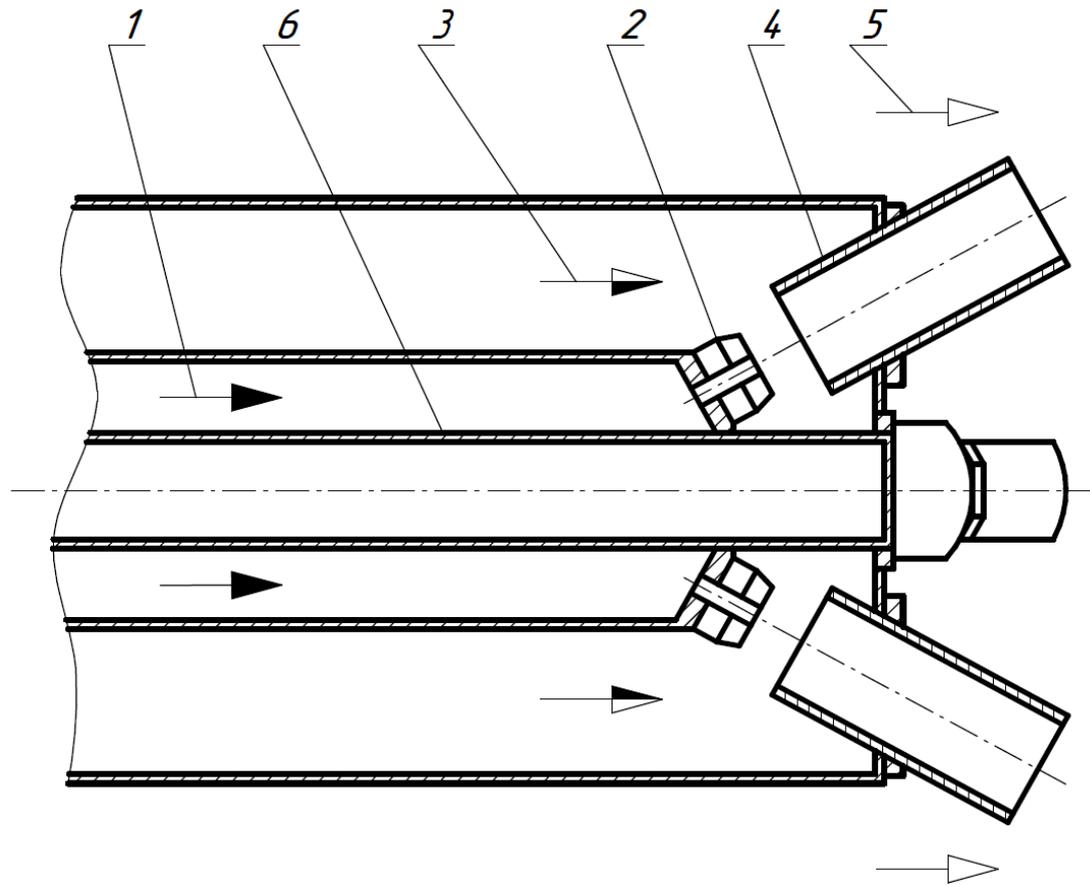


# Сравнение способов подачи газов рециркуляции в топку

Способ подачи газов рециркуляции в топку	A, %*
В топливо	4,5-6,0
В первичный воздух	3,0-3,5
В общий канал дутьевого воздуха	2,5-3,0
По кольцевому каналу вокруг горелки	1,2-1,5
Через шлицы напротив нижнего яруса горелок	1,0
Через шлицы под горелками	0,8-1,0
Через шлицы в поду топки	0,2
*A – характеризует усредненное удельное снижение (в % на 1 % газов рециркуляции г) при рециркуляции продуктов сгорания.	

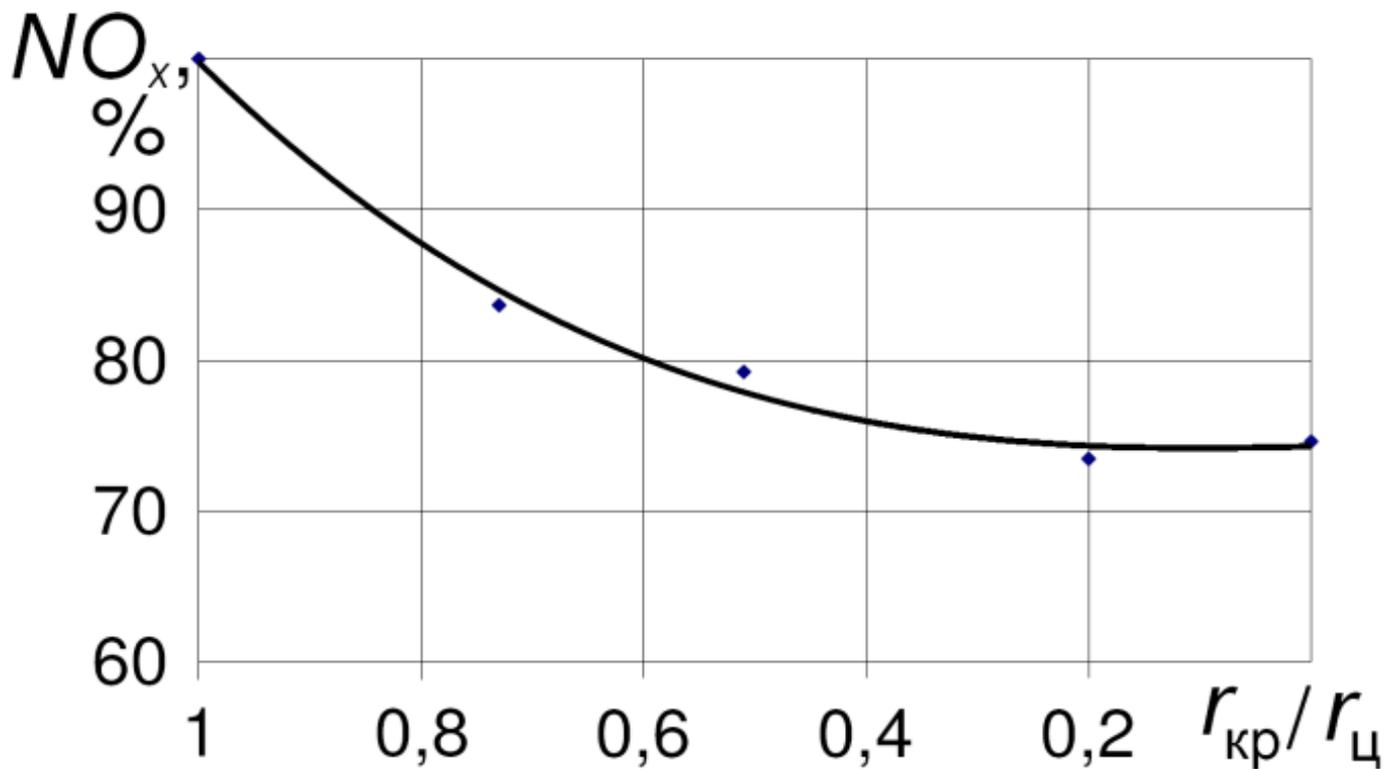


# Принципиальная схема конструкции горелочного устройства с подачей газов рециркуляции в топливо



1 – топливо (природный газ); 2 – топливные калиброванные сопла; 3 – газы рециркуляции;  
4 – инжекционная труба; 5 – воздух; 6 – мазутный канал.

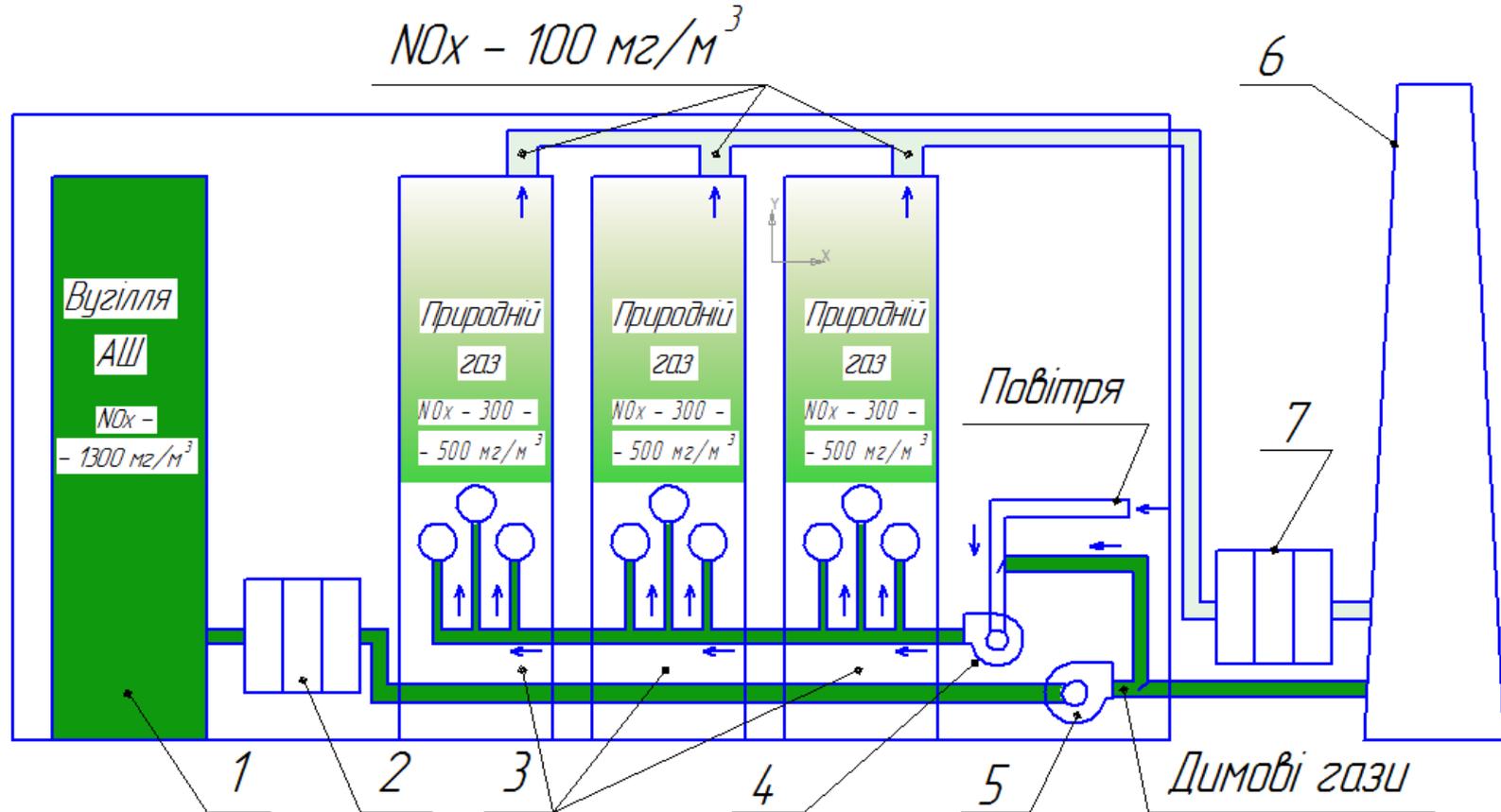




Снижение концентрации  $NO_x$  в продуктах сгорания, (%), при  
неравномерной подаче газов рециркуляции  
в центральные гц и крайние горелочные устройства гкр.



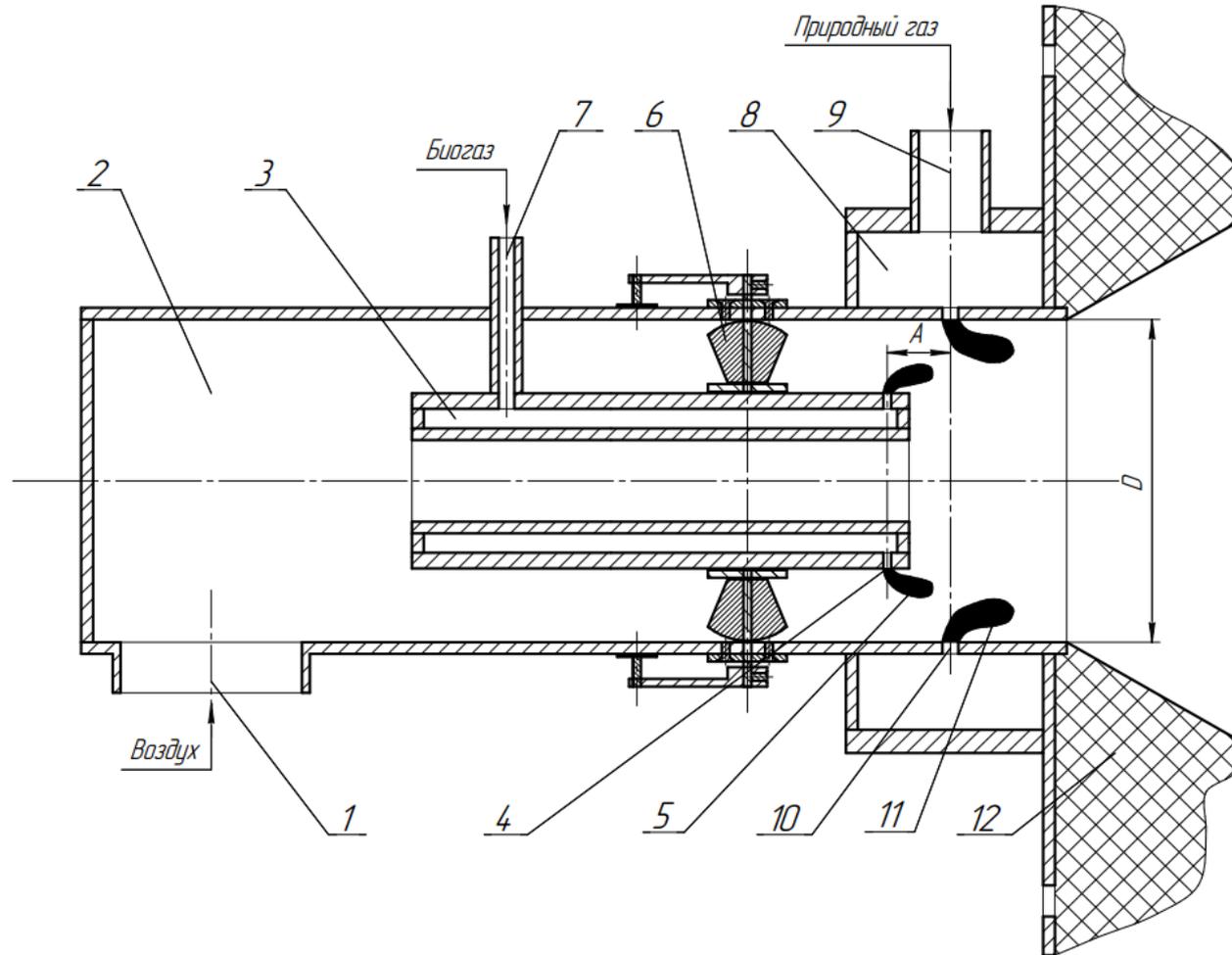
# Схема очистки дымовых газов угольных котлов от оксидов азота (дымовые газы угольного котла подаются как газы рециркуляции в угольные котлы работающие на природном газе)



- 1 – котёл на угле; 2 – скруббер угольного котла; 3 – угольные котлы работающие на газе; 4 – дутьевой вентилятор; 5 – дымосос;  
6 – дымовая труба; 7 – скруббера угольных котлов работающих на газе.



# Схема двухколлекторного вихревого горелочного устройства для совместного сжигания биогаза и природного газа

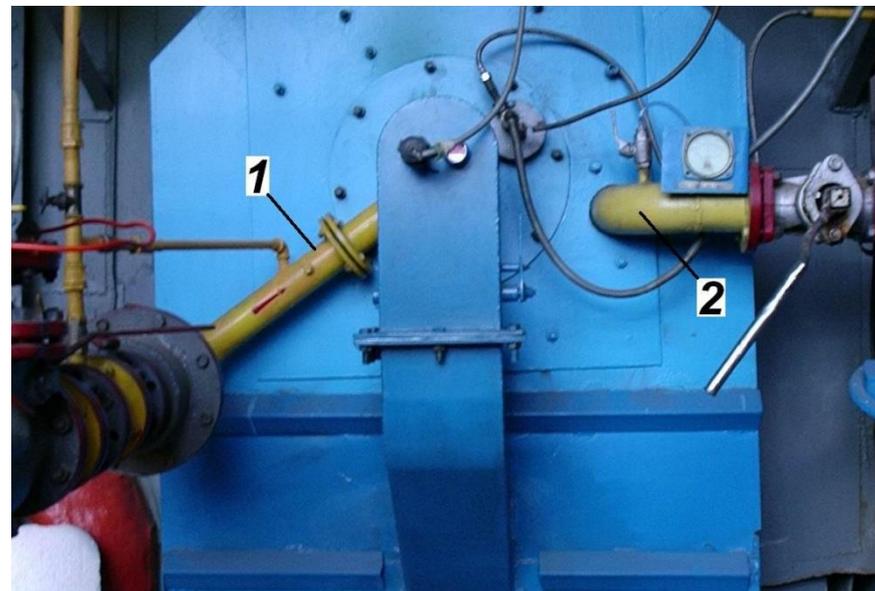


1. воздуховод; 2. корпус горелочного устройства; 3. кольцевой коллектор биогаза; 4. сопла для биогаза; 5. струи биогаза; 6. лопаточный аппарат; 7. патрубок подвода биогаза; 8. кольцевой коллектор природного газа; 9. струи природного газа; 10. патрубок подвода природного газа; 11. сопла природного газа; 12. амбразура горелочного устройств





Котел ДЕ-16/14 Лужанского спиртзавода с установленной новой горелкой ГМ-10-Б,



Котел ДЕ-16/14 Лужанского спиртзавода с установленной новой горелкой ГМ-10-Б, что работает на природном газе (с возможностью работы на биогазе)

1 - трубопровод для подвода природного газа к горелке малого газа (возможно подавать биогаз);

2 - трубопровод природного газа.



# Результаты испытаний котла ТВГ-8М до и после реконструкции

№ п/п	Параметры	До реконструкции (2009 г)		После реконструкции (2012 г.)	
		3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
1.	Нагрузка котла, %	61	81	66	99
2.	Давление газа на входе в горелку, $P_{г}$ , кгс/см <sup>2</sup>	0,06	0,12	0,08	0,18
3.	Расход газа на котел, В нм <sup>3</sup> /ч	682	926	697	1056
4.	Теплотворная способность газа, Q, кКал/м <sup>3</sup>	8081	8081	8274	8274
5.	Температура воды на входе в котел, $t_{вх}$ , °C	44	44	52	52
6.	Температура воды на выходе из котла, $t_{вх}$ , °C	93	110	105	131
7.	Расход воды через котел, D, т/ч	102	102	104	104
8.	Гидравлическое сопротивление, $\Delta P_{к}$ , кгс/см <sup>2</sup>	3,1	3,1	2,5	2,5
9.	Температура уходящих газов, $t_{ух}$ , °C	137	167	87	117
10.	Аэродинамическое сопротивление, $\Delta H$ , кПа	0,49	1,3	0,36	0,91
11.	Содержание в уходящих газах: CO <sub>2</sub> , %	7,3	7,3	9,4	9,6
12.	O <sub>2</sub> , %	8,2	8,2	4,2	3,9
13.	CO, ppm	22	22	24	20
14.	NO <sub>x</sub> , ppm	55	69	71	92
15.	Коэффициент избытка воздуха, $\alpha_{ух}$	1,57	1,57	1,22	1,20
16.	Потери тепла с уходящими газами, $q_2$ , %	7,32	9,08	3,49	4,88
17.	Потери тепла с химическим недожогом, $q_3$ , %	0,0	0,0	0,0	0,0
18.	Потери тепла в окружающую среду, $q_5$ , %	1,24	0,91	1,13	0,75
19.	КПД котла брутто, $\eta_{к}$ , %	91,4	90,0	95,4	94,4



## Контакт

Сигал Исаак Яковлевич

д.т.н., профессор

Зав. отделом Института газа

НАН Украины

Prof., Dr. Isaak Y.Sigal

Head of Department of Air Protection

Combustion, Pollution control

тел. р. +380-(44)-456-62-59

моб. +380-(50)-344-43-26

e-mail: [isigal@ukr.net](mailto:isigal@ukr.net)

