

## Охрана окружающей среды

УДК 621.18:632.15

**Сигал И.Я.**, докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.**, канд. техн. наук,  
**Дубоший А.Н.**, канд. техн. наук, **Горбунов А.В.**, **Горбунов А.А.**  
**Институт газа НАН Украины, Киев**  
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

### Снижение образования оксидов азота при сжигании природного газа

Определены доминантные компоненты газов рециркуляции или балластирующих газов, влияющих на процесс образования  $\text{NO}_x$  при сжигании природного газа, а также способы их ввода в топочную камеру. Установлено, что наибольшее влияние на образование  $\text{NO}_x$  балластные газы осуществляют в случае их предварительного молекулярного перемешивания с газообразным топливом, а не с дутьевым воздухом. Экспериментально показано, что предварительное смешивание балластных газов ( $\text{CO}_2$  или  $\text{N}_2$ ) с природным газом позволяет уменьшить образование оксидов азота при сжигании образованной смеси. Так, при смешивании с природным газом 10 % балластирующих газов ( $[V_6/(V_r - V_6)] \cdot 100$ , при  $\alpha = 1$ ) достигнуто снижение  $\text{NO}_x$  в случае использования  $\text{N}_2$  на 52 %,  $\text{CO}_2$  – на 95 %. Смешивание газов рециркуляции (продукты сгорания) при коэффициенте рециркуляции  $\gamma = 10$  с природным газом в горелочном устройстве снижает выход оксидов азота на 44 %, а при их подаче в смеси с дутьевым воздухом на 24 %. Смешивание  $\text{CO}_2$  с дутьевым воздухом при  $\gamma = 10$  снижает выход оксидов азота на 34 %. Разработаны и опробованы конструкции горелочных устройств для котлов мощностью 110 т/ч пара со смешением в горелочном устройстве газов рециркуляции и природного газа. *Библ. 18, рис. 12, табл. 1.*

**Ключевые слова:** оксиды азота, природный газ, балласт, горение.

Подписание между Украиной и Европейским Союзом договора об Ассоциации [1], в который входит Директива 2010/75/EU [2], определяет новый граничный удельный уровень выбросов загрязняющих атмосферу веществ при сжигании топлив. Вышеуказанная директива заменяет взятые Украиной обязательства при вступлении в Европейское энергетическое сообщество по Директиве 2001/80/ЕС [3], которая частично была учтена украинскими нормами [4], но требует имплементации в национальном законодательстве в оговоренные сроки,

так как Директивы ЕС не являются актами прямого действия.

Природный газ планируется как основное топливо в Украине на период до 2030 г. для целей бытового потребления, теплоснабжения городов, в основном работы городских ТЭЦ, из-за лучших экологических показателей по выбросам вредных веществ в атмосферу среди доступных на рынке топлив [5, 6]. При сжигании природного газа основных загрязнителей, поступающих в атмосферный воздух, всего три:  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{VOCs}$  (volatile organic compounds),

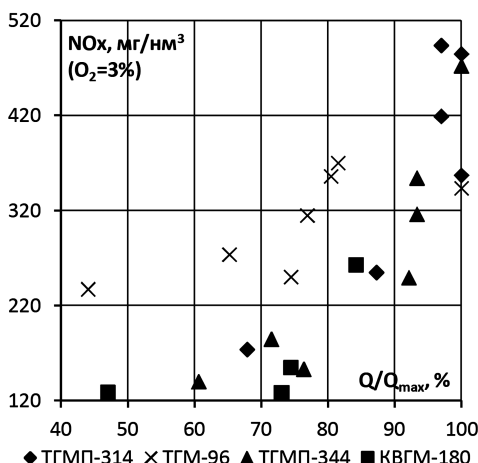


Рис.1. Удельные выбросы NO<sub>x</sub> котлов ТЭЦ (ТГМП-314 (344) и КВГМ-180) при работе с дымососами рециркуляции дымовых газов (ДРГ), ТГМ-96 без ДРГ.

при этом токсический вклад оксидов азота составляет 95–98 % [6, 7], а при сжигании угля в атмосферу дополнительно выбрасываются твердые частички и оксиды серы. Уголь, преимущественно газовых марок, будет использоваться как основное топливо на крупных ТЭС и частично на городских ТЭЦ [5, 8]. В связи с этим с целью улучшения состояния атмосферного воздуха городов (большая концентрация вредных выбросов и населения) необходимо приводить к европейским нормам в первую очередь выбросы оксидов азота при сжигании природного газа.

В таблице показаны нормы по выбросам оксидов азота при сжигании природного газа на ТЭС, ТЭЦ и в котельных для больших (Large Combustion Plant) [2] и средних (Medium Combustion Plant) [9] топливосжигающих установок (ТСУ) (тепловая мощность ТСУ — это сумма входящих мощностей всех котлоагрегатов, подключенных к одной дымовой трубе [2, 10]) и превышение существующих в Украине показателей над нормами.

Как видно из таблицы, основные усилия по снижению выбросов оксидов азота при сжигании природного газа нужно прилагать к суще-

### Нормы по выбросам NO<sub>x</sub> при сжигании природного газа в зависимости от тепловой мощности N\* ТСУ

Наименование	Диапазоны мощностей для существующих ТСУ, МВт			Новые ТСУ, МВт
	1 ≤ N ≤ 5	5 < N < 50	50 ≤ N	1 ≤ N
Нормы ЕС по выбросам NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	250	200	100	100
Диапазоны выбросов NO <sub>x</sub> в Украине, мг/м <sup>3</sup> : NO <sub>x</sub> (сущ.)/NO <sub>x</sub> (норм.)**	1–1,2	1–1,5	2–6	–

\* При таких условиях: O<sub>2</sub> = 3 %, P = 101,325 кПа, сухие газы; \*\* NO<sub>x</sub>(сущ.) — удельные выбросы NO<sub>x</sub> существующими ТСУ в Украине; NO<sub>x</sub>(норм.) — удельные нормативные выбросы NO<sub>x</sub> согласно директивам ЕС.

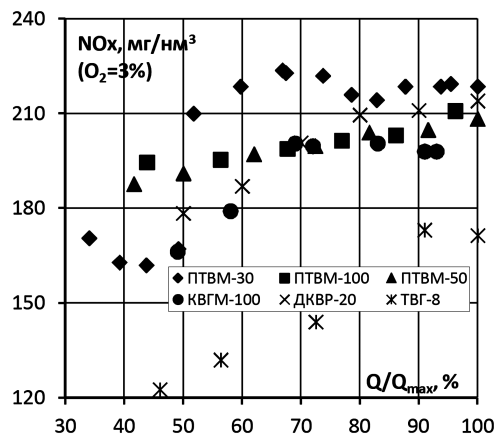


Рис.2. Удельные выбросы NO<sub>x</sub> котлов районных, квартальных и промышленных котельных.

ствующим топливосжигающим установкам мощностью более 50 МВт. В крупных мегаполисах к стационарному оборудованию, существенно загрязняющему атмосферный воздух при сжигании газа, относятся, в первую очередь, котлы теплофикационных энергоблоков ТГМП-314 и ТГМП-344А паропроизводительностью 1000 т пара/ч, котлы на высокие параметры пара (ТГМ-96, ТГМ-84Б, ТП-15, ТП-47 и др.), водогрейные котлы крупных районных котельных (КВГМ-180, КВГМ-100, ПТВМ-180, ПТВМ-100, ПТВМ-50 и др.) и менее мощные водогрейные и промышленные котлы квартальных котельных и промышленных предприятий (ТВГ-8, КВГ-7,56, КВГ-4,65, ДКВР-20/13, ДКВР-10/13, ДЕ-25/14 и др.).

На рис.1 приведены средние показатели по выбросам NO<sub>x</sub> основных мощных котлоагрегатов ТЭЦ, на рис.2 — котлоагрегатов районных, квартальных и промышленных котельных при их работе на природном газе. Как видно из рис.2, котел ТВГ-8 мощностью 10 МВт, разработанный в Институте газа НАН Украины, внедрение которого началось еще в 1960-х гг., имеет меньшие удельные показатели по выбросам оксидов азота. Это объясняется тем, что котел оптимизирован для одного топлива — природного газа, в отличие от остальных, для которых резервным, аварийным или основным топливом является мазут, под сжигание которого должны быть рассчитаны топочная камера и горелки. Особенностью котла ТВГ-8 является секционирование точки двухсветными экранами и применение прямоточных щелевых горелок с подовым расположением [11, 12].

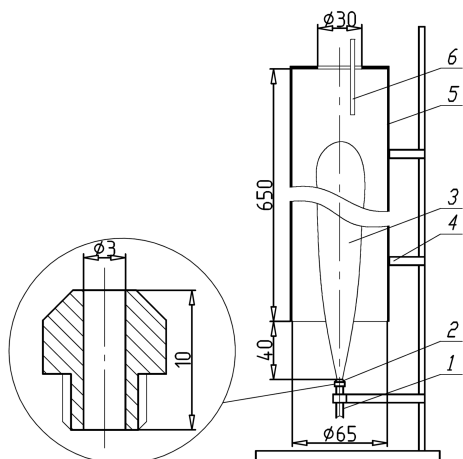


Рис.3. Схема лабораторного стенда для исследования горения смеси природного газа и CO<sub>2</sub> (размеры в мм): 1 – подвод смеси природного газа и диоксида углерода; 2 – насадка; 3 – факел; 4 – штатив; 5 – кварцевый канал; 6 – зонд газоанализатора.

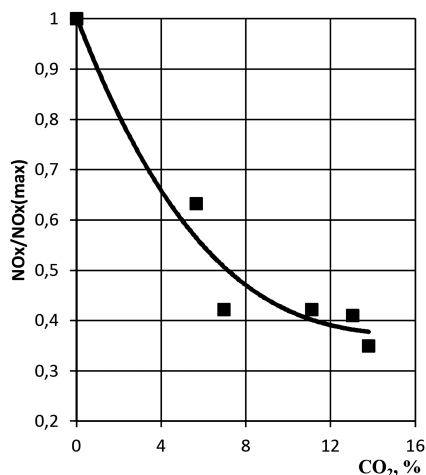


Рис.4. Изменение выхода NO<sub>x</sub> при добавлении CO<sub>2</sub> к природному газу (CH<sub>4</sub> = const).

В Институте газа НАН Украины начиная с 1970-х гг. накоплен опыт лабораторных исследований, а также опытно-экспериментальных проверок и внедрения методов снижения NO<sub>x</sub> на 182 котлах паропроизводительностью от 10 до 1000 т/ч на территории СССР [6, 7, 13].

Цель исследований, результаты которых приводятся в статье, – определение доминантных компонентов газов рециркуляции или балластирующих газов, влияющих на процесс образования NO<sub>x</sub> при сжигании природного газа, а также способов их ввода в топочную камеру.

Основные факторы, которые влияют на образование NO<sub>x</sub>: снижение максимальной температуры в зоне горения из-за ее разбавления более холодными продуктами сгорания или балластными газами и, следовательно, снижение образования оксидов азота по термическому

механизму [14]; снижение концентраций реагирующих веществ – реагентов и активных частиц в зоне реакции; участие CO<sub>2</sub> в химических реакциях в зоне горения [15, 16].

Опыты на экспериментальной установке (рис.3) проводились при сжигании природного газа из городской сети, характеристики которого аналогичны характеристикам газа, сжигаемого в котлах городских котельных и ТЭЦ Киева. На лабораторной установке исследовали подмешивание CO<sub>2</sub> к природному газу (имитировался биогаз) и подачу образованной смеси через сопловое отверстие диаметром 3 мм при начальном ламинарном режиме горения природного газа [17]. Результаты зависимости NO<sub>x</sub> от концентрации CO<sub>2</sub> в смеси (CH<sub>4</sub> = const) приведе-

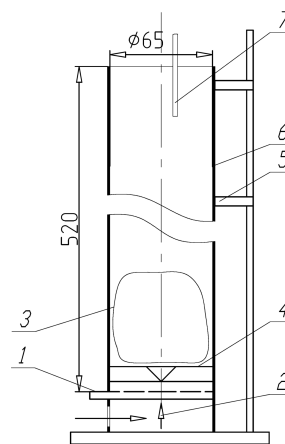


Рис.5. Схема лабораторного стенда для исследования горения смеси природного газа и CO<sub>2</sub> (размеры в мм): 1 – подвод смеси природного газа и диоксида углерода; 2 – подвод воздуха; 3 – факел; 4 – стабилизатор; 5 – штатив; 6 – кварцевый канал; 7 – зонд газоанализатора.

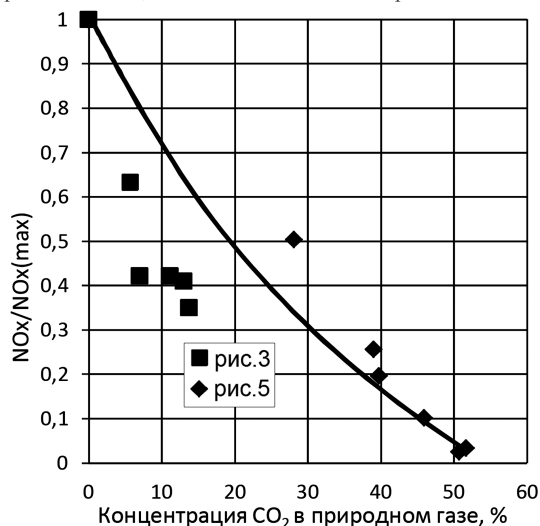


Рис.6. Экспериментальные точки зависимости NO<sub>x</sub> от концентрации CO<sub>2</sub> в природном газе со стендов, приведенных на рис.3 и рис.5.

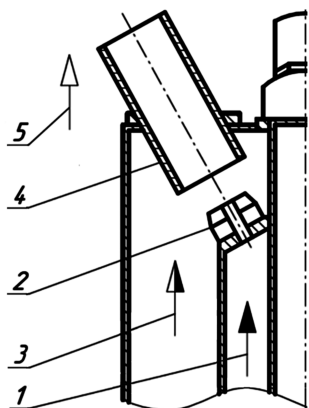


Рис.7. Схема сегмента промышленной горелки с подмешиванием газов рециркуляции к природному газу: 1 — природный газ; 2 — сопло; 3 — газы рециркуляции; 4 — эжекционный канал; 5 — воздух.

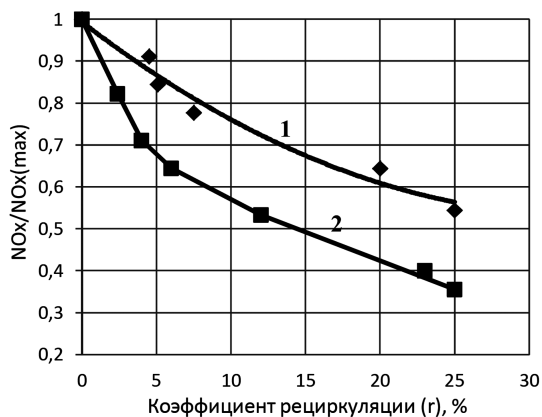


Рис.8. Концентрация NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания экспериментальной установки при подаче газов рециркуляции в смеси с воздухом (1) и природным газом (2).

ны на рис.4 (NO<sub>x</sub>, мг/нм<sup>3</sup> — текущая концентрация; NO<sub>x</sub>(max), мг/нм<sup>3</sup> — максимальная концентрация).

Поскольку стабилизация факела при добавлении CO<sub>2</sub> к природному газу для сопла диаметром 3 мм начала существенно ухудшаться и при добавлении в природный газ более 14 % CO<sub>2</sub> факел срывался, был использован лабораторный стенд с применением горелочного устройства, оснащенного специальным стабилизатором, что позволило увеличить концентрацию CO<sub>2</sub> (а в следующей серии опытов — азота) в смеси с природным газом до 55 % (рис.5). Результаты исследований снижения NO<sub>x</sub> в зависимости от концентрации CO<sub>2</sub> приведены на рис.6, на который нанесены две группы экспериментальных точек, полученных на стендах (см. рис.3 и 5) и усредненных общей кривой.

Перспективным с точки зрения образования минимальных концентраций оксидов азота есть

подмешивание газов рециркуляции, которые представляют собой смесь CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и различных примесей, в природный газ. Степень рециркуляции дымовых газов (r) — это отношение расхода дымовых газов, отбираемых на рециркуляцию, к расходу дымовых газов за местом отбора.

На рис.7 показана схема промышленной горелки с подмешиванием газов рециркуляции к природному газу, на рис.8 — результаты экспериментальных исследований, проведенных на лабораторном стенде при подмешивании газов рециркуляции к природному газу и воздуху [18]. Подача дымовых газов рециркуляции в природный газ была технически реализована на двух барабанных котлах паропроизводительностью 110 т/ч и показала высокую эффективность по снижению выбросов оксидов азота.

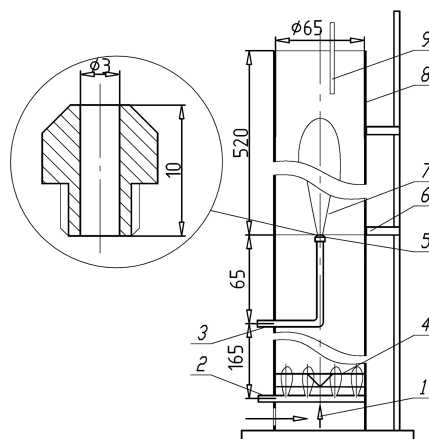


Рис.9. Схема лабораторного стенда для исследования горения смеси природного газа и CO<sub>2</sub> (размеры в мм): 1 — подвод воздуха; 2 — подвод CO<sub>2</sub>; 3 — подвод природного газа; 4 — турбулизатор; 5 — сопло; 6 — штатив; 7 — факел; 8 — кварцевый канал; 9 — зонд газоанализатора.

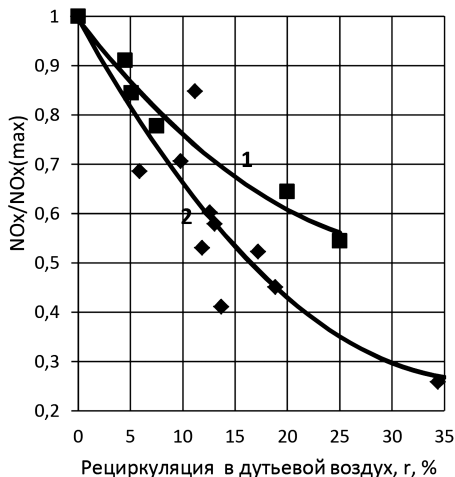


Рис.10. Изменение выхода оксидов азота при горении природного газа и добавке к дутьевому воздуху: 1 — газов рециркуляции [18], 2 — CO<sub>2</sub>

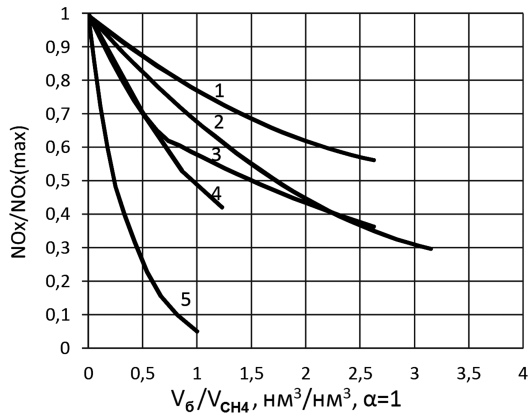


Рис.11. Зависимость выхода оксидов азота при добавлении балласта различного состава и способов его подачи в зону горения: 1 – подмешивание ДГ к дутьевому воздуху; 2 – подмешивание  $CO_2$  к дутьевому воздуху; 3 – смешивание ДГ с природным газом в горелке (см. рис.7); 4 – подача смеси  $N_2$  и природного газа; 5 – подача смеси  $CO_2$  и природного газа;  $V_6$  – объем балласта;  $V_{сн4}$  – объем природного газа.

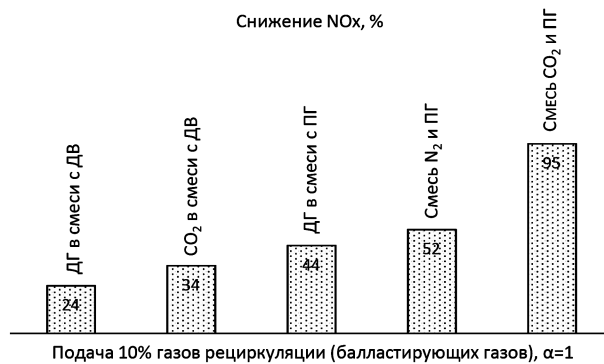


Рис.12. Зависимость снижения выброса оксидов азота при подаче 10 % газов рециркуляции (балластирующих газов) различного состава и способов их подачи в зону горения: ДГ – дымовые газы; ДВ – дутьевой воздух; ПГ – природный газ.

Для определения влияния  $CO_2$  на образование оксидов азота его подача осуществлялась в дутьевой воздух на экспериментальном стенде, показанном на рис.9. Результаты исследования приведены на рис.10 и для сравнения эффективности приведены исследовательские точки при подмешивании дымовых газов к дутьевому воздуху [18].

На рис.11 показано обобщение рассмотренных выше методов снижения  $NO_x$  при добавлении балласта различного состава ( $CO_2$ ,  $N_2$ , ДГ) и способов его подачи в зону горения при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ .

На рис.12 показано сравнение снижения  $NO_x$ , % при горении природного газа и подаче 10 % газов рециркуляции или балластирующих газов ( $[V_6/(V_T - V_6)] \cdot 100$ , при  $\alpha = 1$ ) различного состава и способов их подачи в зону горения, где  $V_T$  (нм³) – объем дымовых газов.

## Выводы

Установлено, что наибольшее влияние на образование  $NO_x$  балластные газы оказывают в случае их предварительного молекулярного перемешивания с газообразным топливом, а не с дутьевым воздухом. Экспериментально показано, что предварительное смешивание балластных газов ( $CO_2$  или  $N_2$ ) с природным газом позволяет уменьшить образование оксидов азота при сжигании образованной смеси. Так, при смешивании с природным газом 10 % балластирующих газов ( $[V_6/(V_T - V_6)] \cdot 100$ , при  $\alpha = 1$ ) достигнуто снижение  $NO_x$  в случае использования  $N_2$  на 52 %,  $CO_2$  – на 95 %.

Смешивание газов рециркуляции (продукты сгорания) при коэффициенте рециркуляции  $\gamma = 10$  с природным газом в горелочном устройстве снижает выход оксидов азота на 44 %, а при их подаче в смеси с дутьевым воздухом на 24 %. Смешивание  $CO_2$  с дутьевым воздухом (при  $\gamma = 10$ ) снижает выход оксидов азота на 34 %.

Разработаны и опробованы конструкции горелочных устройств для котлов мощностью 110 т/ч пара со смешением в горелочном устройстве газов рециркуляции и природного газа.

## Список литературы

1. Угода про Асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. – Міждержавний договір України. – Київ, бер. 2014. – 277 с. – Режим доступу: <http://www.consilium.europa.eu/en/documents-publications/agreements-conventions/agreement/?aid=2014045>
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). – 119 p. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>.
3. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. – 21 p. – Режим доступу: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0080>
4. Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплотехнічних установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.08 № 541. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08>
5. Энергетична стратегія України на період до 2030 р. : Розпорядження Кабінету Міністрів України від

- 24.07.13 № 1071-р. — Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/file/text/24/f417479n5.zip>.
6. Сигал І.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л. : Недра, 1988. — 313 с.
  7. Сигал І.Я., Дубоший А.Н., Сигал А.И., Смихула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выброса оксидов азота котлами электростанций // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 1. — С. 48–52.
  8. Карп І.Н., Сигал І.Я., Смихула А.В., Дубоший А.Н. Об изменении проектного топлива на электростанциях Украины // Энергетика и электрификация. — 2016. — № 3. — С. 27–36.
  9. Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. — Режим доступу. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>
  10. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок : Кінцевий проект. — Київ, 15 березня 2015 р. — 78 с. — Режим доступу: — <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>.
  11. А.с. 173396 СССР, МПК F 24 d, F 23 f. Водогрейный котел / И.Я.Сигал, Е.М.Лавренцов, Э.П.Домбровская. — Оpubл. 21.07.65, Бюл. № 15.
  12. Лавренцов Е.М., Сигал І.Я., Смихула А.В. и др. Модернизация водогрейных котлов ТВГ // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 6. — С. 70–76.
  13. Сигал І.Я., Нижник С.С. Зменшення утворення оксидів азоту рециркуляцією продуктів згоряння // Цукор України. — 1994. — № 3. — С. 14–16.
  14. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каме-нецкий Д.А. Окисление азота при горении. — М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1947. — 145 с.
  15. Liu F., Guo H., Smallwood G. J. The Chemical Effect of CO<sub>2</sub> Replacement in Air on the Burning Velocity of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> Premixed Flames // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 133. — P. 495–497.
  16. Гуревич Н.А. Химическое влияние добавки CO<sub>2</sub> на скорость горения метана по теории Зельдовича // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2011. — № 5. — С. 3–10.
  17. Сигал І.Я., Смихула А.В., Марасин А.В. и др. Экспериментальное исследование биогаза как топлива для котлов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2013. — № 5. — С. 26–32.
  18. Сигал І.Я., Косинов О.И., Дубоший А.Н., Нижник С.С. Повышение эффективности методов снижения образования оксидов азота в топках котлов // Теплоэнергетика. — 1986. — № 7. — С. 6–9.

Поступила в редакцию 20.07.16

**Сигал І.Я.,** докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.,** канд. техн. наук, **Дубоший О.М.,** канд. техн. наук, **Горбунов О.В., Горбунов А.О.**  
**Інститут газу НАН України, Київ**  
 вул. Десятірівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: [isigal@ukr.net](mailto:isigal@ukr.net)

## Зниження утворення оксидів азоту при спалюванні природного газу

Визначено домінантні компоненти газів рециркуляції або баластуючих газів, що впливають на процес утворення NO<sub>x</sub> при спалюванні природного газу, а також способи їх введення у топкову камеру. Встановлено, що найбільший вплив на утворення NO<sub>x</sub> баластні гази здійснюють у разі їх попереднього молекулярного перемішування з газоподібним паливом, але не з дуттьовим повітрям. Експериментально показано, що попереднє змішування баластних газів (CO<sub>2</sub> або N<sub>2</sub>) з природним газом дає змогу зменшити утворення оксидів азоту при спалюванні утвореної суміші. Так, при змішуванні з природним газом 10 % баластуючих газів  $[(V_6 / (V_r - V_6)) \cdot 100]$ , при  $\alpha = 1$  досягнуто зниження NO<sub>x</sub> у разі використання N<sub>2</sub> на 52 %, CO<sub>2</sub> — на 95 %. Змішування газів рециркуляції (продукти згоряння) при коефіцієнті рециркуляції  $\gamma = 10$  з природним газом у палиниковому пристрої зменшує вихід оксидів азоту на 44 %, а при їх подачі у суміші з дуттьовим повітрям на 24 %. Змішування CO<sub>2</sub> з дуттьовим повітрям при  $\gamma = 10$  зменшує вихід оксидів азоту на 34 %. Розроблено та випробувано конструкції палиникових пристроїв для котлів потужністю 110 т/год пари зі змішуванням у палиниковому пристрої газів рециркуляції й природного газу. *Бібл. 18, рис. 12, табл. 1.*

**Ключові слова:** оксиди азоту, природний газ, баласт, горіння.

**Sigal I.Ya.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
**Smikhula A.V.**, Candidate of Technical Sciences,  
**Duboshiy O.M.**, Candidate of Technical Sciences,  
**Horbunov O.V., Horbunov A.O.**

*The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev*  
 39, Degtjarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

## Reducing the Formation of Nitrogen Oxides During the Combustion of Natural Gas

The purpose of researches, the results of which are given in the article was to determine the dominant components of ballasting gases that affect the formation of  $\text{NO}_x$  during combustion of natural gas, as well as methods their feed into the combustion chamber. It is defined that most influence for formation  $\text{NO}_x$  in exhaust gases derive in case is ballast gas with gaseous fuels on molecular level pre-mixed, but not with blast air. It was shown experimentally that premixing the ballast gas ( $\text{CO}_2$  or  $\text{N}_2$ ) with the natural gas provides reducing the formation of nitrogen oxides during combustion of the mixture. Thus, by mixing natural gas with 10 % ballasting gas ( $[\text{V}_6 / (\text{V}_r - \text{V}_6)] \cdot 100$ ,  $\alpha = 1$ )  $\text{NO}_x$  reduction achieved in the case of using  $\text{N}_2$  52 %,  $\text{CO}_2$  – 95 %. Mixing exhaust gases (combustion products) at the recirculation ratio  $r = 10$  with natural gas in the burner reduces the yield of nitrogen oxides by 44%, and in case their pre-mixing with blast air on the 24 %.  $\text{CO}_2$  mixing with blast air ( $r = 10$ ) reduces the yield of nitrogen oxides by 34 %. Developed and tested burners for boilers with capacity of 110 t/h of steam with added exhaust gases to natural gas in the burner. *Bibl.18, Fig.12, Tab.1.*

**Key words:** nitrogen oxides, natural gas, ballast, combustion.

### References

1. Association Agreement between the European Union and the European Atomic Energy Community and their Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part, Kiev, March 2014, 277 p. – Access mode: <http://www.consilium.europa.eu/en/documents-publications/agreements-conventions/agreement/?aid=2014045> (Ukr.)
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), 119 p. – Access mode: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>
3. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants, 21 p. – Access mode: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0080>
4. Pro zatverdzhennya tekhnolohichnykh normatyviv dopustymykh vykydiv zabrudnyuyuchykh rehovyn iz teplosylovykh ustanovok, nominalna teplova potuzhnist yakykh perevyshchuye 50 MVt : Nakaz Ministerstva okhorony navkolnyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Ukrainy from 22.10.2008 No. 541. (Ukr.)
5. Enerhetychna stratehiya Ukrainy na period do 2030 r. : Kabinet of Ministers of Ukraine – Law of Ukraine, 24.07.2013 No. 1071-p. – Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/file/text/24/f417479n5.zip> (Ukr.)
6. Sigal I.Ya. Protection of ambient air at fuel burning: Monograph, Leningrad : Nedra., 1988, 313 p. (Rus.)
7. Sigal I.Ya., Duboshiy A.N., Sigal O.I., Smikhula A.V. The efficiency increase of smoked gases recirculation influence on nitrogen oxides emission from power plant boilers reduction, *Energotehnologii i resursoberezhnie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2010, (1), pp. 48–52. (Rus.)
8. Karp I.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Duboshiy O.M. [About Change Fuel Project for Large Fossil-Fuel Thermal Power Station of Ukraine], *Enerhetyka i elektryfikatsyya*, 2016, (3), pp. 27–36.
9. Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. – Access mode: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>
10. Natsionalnyy plan skorochennya vykydiv vid velykykh spalyvalnykh ustanovok, Kiev, 15 March 2015, 78 p. – Access mode: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332> (Ukr.)
11. Certificate of authorship 173396 USSR. Vodohreynnyy kotel, I.Ya.Sigal, E.M.Lavrentsov, E.P. Dombrovskaya, Publ. 21.07.65, Bull. 15. (Rus.)
12. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Berezanskiy V.V., Ovchar V.V. [Water Boilers of

- TVG and KVG Types Modernization], *Energotekhnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2010, (6), pp. 70–76. (Rus.)
13. Sigal I.Ya., Nizhnik S.S. Zmenshennya utvorenniya oksidiv azotu retsirkulyatsiyu produktiv zgoryannya, *Tsukor Ukraini*, 1994, (3), pp. 14–16. (Ukr.)
  14. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetskiy D.A. Okisleniye azota pri gorenii [Formation of Nitric Oxide Following Combustion], Moscow, Leningrad : Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, 1947, 145 p. (Rus.)
  15. Liu F., Guo H., Smallwood G.J. The Chemical Effect of CO<sub>2</sub> Replacement in Air on the Burning Velocity of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> Premixed Flames, *Combustion and Flame*, 2003, 133, pp. 495–497.
  16. Gurevich N.A. The chemical effect of CO<sub>2</sub> addition on methane burning velocity by Zel'dovich theory, *Energotekhnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2011, (5), pp. 3–10. (Rus.)
  17. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Marasin O.V., Kouts V.P., Dombrowska E.P., Kolchev V.O., Kerna-zhytska E.S. [Experimental research of a biogas as a fuel for boilers], *Energotekhnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2013, (5), pp. 26–32. (Rus.)
  18. Sigal I.Ya., Kosinov O.I., Duboshiy O.M., Nizhnik S.S. Povysheniye effektivnosti metodov snizheniya obrazovaniya oksidov azota v topkakh kotlov, *Teplenergetika*, 1986, (7), pp. 6–9. (Rus.)

Received July 20, 2016

УДК 544.726:66.087.97:66.065.31:66.935.5

**Мовчанюк О.М.**, канд. техн. наук, **Гомеля Н.Д.**, докт. техн. наук, проф.  
**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»**, Киев  
 просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: movchaniukom@gmail.comet

## Гетерогенные ионообменные целлюлозные мембраны для электродиализа

Разработан новый способ получения целлюлозных гетерогенных ионообменных мембран для электродиализа с целью обессоливания морских и солоноватых вод, а также для безреагентной переработки техногенных отходов в виде слабых растворов солей с одновременной регенерацией кислот и щелочей и с возвращением их в технологический процесс. Исследовано влияние композиции полученных мембран на их электро-транспортные характеристики. Произведен сравнительный анализ электропроводности и селективности мембран с серийными ионообменными мембранами МК-40 и МА-41. Показано, что изготовленные образцы мембран имеют достаточно высокую электропроводность, которая в некоторых случаях выше, чем у серийных мембран МК-40 и МА-41. Установлено, что селективность новых мембран не ниже, чем у серийных ионообменных мембран. Полученные мембраны близки по эффективности к серийным при опреснении раствора сульфата натрия. *Бібл. 8, рис. 6, табл. 3.*

**Ключевые слова:** мембрана, целлюлоза, катионит КУ-2-8, анионит АВ-17-8, электродиализ, раствор сульфата натрия, электропроводность, селективность по переносу противоионов.

В настоящее время в различных сферах широко используются такие мембранные процессы первого поколения, как электродиализ, ультра- и нанофильтрация, обратный осмос [1]. Электродиализ может использоваться для очистки воды от растворимых солей, концентрирования растворов солей, а также для электрохимической регенерации отработанных соляно- и сернокислых травильных растворов. Например, в некоторых производствах в качестве технологических растворов используют серную кислоту и гидроксид натрия. В результате образуются

отработанные растворы, содержащие сульфат натрия, которые считаются малотоксичными и сбрасываются в сточные воды.

Экологические проблемы, связанные с образованием и сбросом отработанных растворов, содержащих сульфат натрия, можно было бы решить с помощью переработки таких растворов электродиализом с получением в результате серной кислоты и гидроксида натрия такой чистоты и концентрации, которая позволяла бы вернуть их в технологический процесс [2].