

Сигал И.Я.¹, докт. техн. наук, проф.,

Смихула А.В.¹, канд. техн. наук, **Сигал А.И.²**, канд. техн. наук

¹ **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

² **Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев**

ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина, e-mail: office@engecology.com

Опыт разработки горелочных устройств, топочных камер и технологий снижения выбросов оксидов азота при сжигании природного газа в котельных агрегатах

Рассмотрены особенности конструктивных решений, заложенных в горелочные устройства и топочные камеры котлоагрегатов, которые применяются как при переводе твердотопливных котлов на природный газ, так и создании новых конструкций газовых котлоагрегатов. Показано, что в работах по снижению выбросов оксидов азота, начатых в Институте газа еще в 1960-х гг., уже к 1971 г. были достигнуты значительные результаты. Рассмотрены основные методы и технические решения, которые применяются для снижения выбросов оксидов азота при сжигании природного газа на котлах различной мощности, в том числе энергоблоков 300 МВт. Приведена принципиальная конструкция горелочного устройства стадийного сжигания, которая используется в Украине и странах СНГ в количестве более 2000 единиц. Показано, что установленные горелочные устройства стадийного сжигания природного газа требуют немедленной реконструкции с приведением их показателей на первом этапе к расчетным, а на втором возможна их модернизация для достижения показаний директивы 2010/75/EU ЕС по выбросам. Показаны наиболее перспективные технологии дальнейшего снижения уровня выбросов оксидов азота ниже 100 мг/нм³ (3 % O₂, сухие газы) при сжигании природного газа. *Библ. 38, рис. 4, табл. 1.*

Ключевые слова: котлы, оксиды азота, горение, топка, горелка.

В начале 1950-х гг. в СССР при замене угля и торфа на природный газ особенно в небольших котлах, отапливающих одно или несколько многоэтажных зданий, вследствие отсутствия опыта работы с газообразным топливом возникли проблемы с их розжигом и эксплуатацией. Попытки перевода таких котлов, часть из которых были секционные чугунные, со слоевого сжигания угля на сжигание природного газа сопровождалась взрывами газа в топках котлов, а также выходом из строя поверхностей нагрева котла, покрытых накипью из-за низкого качества химводоочистки. Это происходило из-за того, что при сжигании газа во фронтальных горелках развивались локальные температуры, на 200–300 °С превышающие имевшиеся ранее при работе на твердом топливе (дровах, угле, торфе).

В 1960–1970 гг. в связи с очень быстрым развитием энергетики и промышленности, а также стремительным ростом городского насе-

ления оказалось, что их взаимная концентрация на ограниченной площади приводит к резкому ухудшению атмосферного воздуха, что вызывает не только снижение качества жизни людей, но и значительно увеличивает их заболеваемость, а это дополнительные государственные расходы на здравоохранение. В связи с этим в СССР начали проводиться активные исследования в направлении экологии в энергетике и промышленности.

Опыт создания универсальных горелочных устройств и конструкций топков котлов в Украине и СНГ

Поскольку каждый тип котла, который планировалось перевести на газ, имел свои особенности, целесообразно было разработать универсальное горелочное устройство, которое пошло бы в большинство топочных камер котлов малой и средней мощности и не привело к

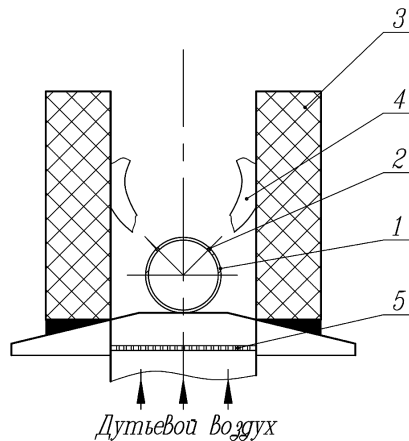


Рис.1. Принципиальная схема щелевой подовой горелки с прямой щелью и стабилизацией оторванных газовых струй на горячей поверхности: 1 – коллектор для раздачи газа; 2 – отверстия для подачи газа; 3 – прямая щель (горелочный туннель); 4 – горение оторванной газовой струи на поверхности щели; 5 – перфорированная решетка для выравнивания эпюры воздуха.

преждевременному выходу ее из строя. В качестве такого устройства были разработаны подовые горелки с прямой щелью-смесителем, которые устанавливались на колосниковой решетке котлов и обеспечивали равномерный обогрев поверхностей топочной камеры [1]. Стабилизация факела в этих горелках обеспечивается за счет удара струи газа о горячую стенку из огнеупорного материала (кирпича), что позволяет существенно увеличить мощность такой горелки (1 МВт/м, погонный) по сравнению с другими подовыми горелками [2, 3] (рис.1). В последние 15 лет для мощных котлов ПТВМ испытаны усовершенствован-

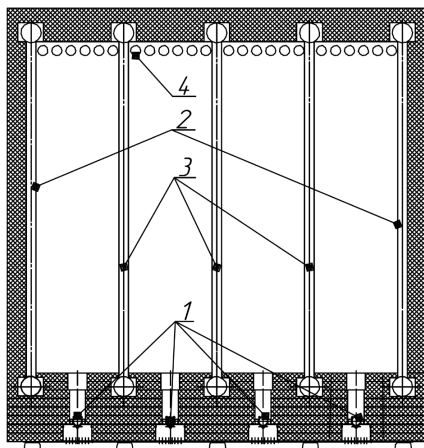


Рис.2. Схема топочной камеры с применением секционирования топки двусветными газопроницаемыми экранами, расположенными между подовыми горелочными устройствами: 1 – подовые щелевые горелочные устройства; 2 – настенные экраны; 3 – двусветные экраны; 4 – потолочный экран.

ные подовые горелочные устройства удельной тепловой мощностью 4,4 МВт/м [4, 5].

При использовании подовых горелок стенки пода прогреваются до 1000–1100 °С, что при низкой степени черноты газового факела создает условие для эффективной дополнительной теплоотдачи пода, который можно рассматривать в качестве промежуточного излучателя. Для определения условной температуры излучателя с учетом малой конвективной составляющей для практических расчетов можно использовать зависимость [1]:

$$T_{\text{изл}} = a_{\text{ф}}^{0,25} T_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где $a_{\text{ф}}$ – степень черноты факела; $T_{\text{ф}}$ – температура факела, К.

При этом имеет место прирост видимого коэффициента лучеиспускания топки, который с рядом допущений может быть записан в таком виде [1]:

$$\delta = \frac{\delta_{\text{вид}}^{\text{с пал}}}{\delta_{\text{вид}}^{\text{без пал}}} \approx 1 + \omega(1 - a_{\text{ф}}), \quad (2)$$

где ω – отношение площади поверхности излучателя $F_{\text{изл}}$ к водоохлаждаемой поверхности, размещенной в топке, $F_{\text{в}}$.

С учетом разработок и консультаций Института газа НАН Украины методы проектирования перевода котлов на газ освоили 34 проектные организации. Уже в первые 2 года было переведено на газ более 3 тыс. котлов в Украине, России, Средней Азии и других регионах. К 2019 г. в Украине и странах СНГ используется более 50 тыс. щелевых подовых горелочных устройств. За более чем 40-летний срок службы были выявлены их недостатки и внесен ряд изменений с целью их усовершенствования. Так, современное подовое сертифицированное горелочное устройство именуется МПИГ-3 (модернизированная подовая излучающая горелка), изготавливается из высококачественных сталей, комплектуется калиброванными соплами, а керамическая щель имеет внезапное расширение. Их опыт применения на котлах ДКВР и ТВГ, в том числе при сжигании биогаза, показал надежную и экономичную работу [2–7].

Одним из удачных решений конструкций топочной камеры для отопительных котлоагрегатов при сжигании газа, по мнению авторов этой статьи, является секционирование топки на отсеки газопроницаемыми двусветными экранами, в каждом из которых расположено отдельное горелочное устройство. Это позволяет выдерживать теплонапряжение топочного объе-

ма водогрейного котла мощностью 4–10 МВт на уровне 0,5 МВт/м³ без уменьшения ресурса топки котла. В настоящее время такие топки в составе котлов типов ТВГ и КВГ конструкции Института газа НАН Украины установлены в количестве более 8 тыс. в Украине и СНГ. Они отработали более 40 лет и продолжают эксплуатироваться и выпускаться промышленностью [8, 9] (рис.2). Котлы с такими конструкциями топок обеспечивают теплоснабжение жилых кварталов сотен городов Украины, России, Литвы, Латвии, Узбекистана, Казахстана и других стран.

Снижение выбросов оксидов азота в атмосферный воздух и утилизация вредных выбросов химических предприятий

Хотя при сжигании природного газа и не образуются такие опасные вредные загрязнители, как пыль и оксиды серы, а только оксиды азота в концентрациях в среднем в 2 раза меньше, чем при сжигании угля [10, 11], оказалось, что, суммируясь с вредными выбросами NO_x от автотранспорта (особенно дизельных автомобилей), они являются одним из самых проблемных загрязнителей атмосферного воздуха городов Европы и Украины [11, 12].

Важность решения задачи снижения удельных выбросов в окружающую среду обобщивается и тем, что, по данным наблюдений, в частности, Национальной гидрометслужбы Украины, в последние годы в более чем 20 городах Украины средние концентрации по диоксиду азота превышают ПДК_{сс} (предельно допустимая среднесуточная концентрация). В некоторых городах наблюдается превышение по другим загрязнителям: формальдегиду, твердым частицам, фенолу, оксиду углерода и др. Напомним, что «ПДК химического соединения во внешней среде понимается такая концентрация, при воздействии которой на организм человека периодически или в течение всей жизни — прямо или опосредованно (через экологические системы, а также через возможный экономический ущерб) — не возникает соматических или психических заболеваний (в том числе скрытых или временно компенсированных) или изменений состояния здоровья, выходящих за пределы приспособительных физиологических реакций, обнаруживаемых современными методами сразу или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений» [13].

Проблемой вредных выбросов в атмосферу при сжигании топлива в котлах, в частности,

природного газа в Институте газа начали заниматься еще в 1960-х гг. под руководством Сигала И.Я. Так, была создана химическая лаборатория, которая занималась исследованием токсичности продуктов сгорания, и разработана методика проведения исследований [14]. В 1968–1971 гг. были проведены исследования по изучению механизма образования оксидов азота в факеле в водоохлаждаемом канале с малым углом конусности. Эти и другие исследования [14–17] показали, что, кроме «термического» механизма, сформулированного Я.Б.Зельдовичем [18], при горении газа действует и другой механизм образования NO. Одновременно с этим в 1971 г. американским ученым Fenimore С.Р. был раскрыт механизм «быстрого» образования NO при горении углеводородных топлив через радикал СН с образованием HCN и N [19]. Однако, в 1999 г. в работе [20] было показано, что при взаимодействии СН с молекулярным азотом образование радикала HCN невозможно, а в работах [21, 22], что вместо этого образуются радикалы NCN и Н.

Проведенные экспериментальные исследования позволили составить схему образования NO в факеле и в топочной камере котла, а Сигалом А.И. на электрических печах СУОЛ-2 и СДО экспериментально показано, что даже при отсутствии горения при температурах выше 1000–1100 °С следует учитывать NO_x, образованные по термическому механизму из воздуха («термические» воздушные) [1] (рис.3, зона 3 на

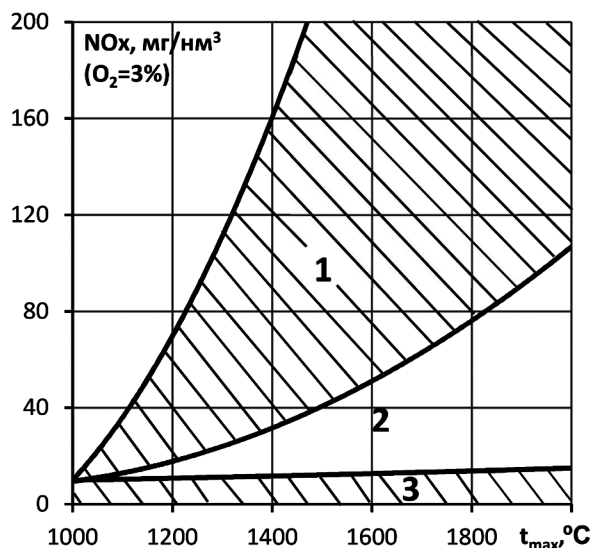


Рис.3. Схема образования оксидов азота в диффузионном газовом факеле в топке котла в зависимости от температуры. Диапазоны образования NO_x: 1 — «термические»; 2 — «быстрые»; 3 — воздушные «термические» остаточные.

диаграмме). Они могут составлять до 15 мг/м^3 и остаются при всех технологиях снижения NO в качестве «остаточных», не позволяющих получить нулевые значения выхода NO при горении. Таким образом, снижение образования оксидов азота в котлах при сжигании газа заключается в ликвидации «термических» NO и возможном снижении «быстрых» ниже уровня 100 мг/м^3 (при 3 % O_2 , сухие газы) до уровня «термических» остаточных.

«Термические» NO_x (рис.3, зона 1) образуются в результате цепных реакций в пламени и имеют сильную температурную зависимость. Зельдовичем Я.Б. показано, что они образуются в основном в зоне максимальных температур и ведущую роль играет реакция окисления молекулярного азота атомарным кислородом [18].

В 1970-х гг. были выполнены одни из первых работ по снижению образования NO_x в котлах энергоблоков 300 и 200 МВт на газе за счет рециркуляции продуктов горения в горелочные устройства (Киевская ТЭЦ-5, Сургутская ГРЭС и др.) [1]. Разработаны одни из первых в Европе газомазутные горелки двухступенчатого горения с пониженным образованием оксидов азота (ГДС-100 и ГДС-50 для котлов ПТВМ-100 и ПТВМ-50, а также паровых типа Е-50-140, БКЗ и др.), которые были доработаны, изготовлены, испытаны и установлены при сотрудничестве с ВТИ [23] в Москве, Ленинграде, Вильнюсе, Риге, Софии, более чем на 200 котлах ПТВМ-100 и ПТВМ-50 в Киеве (районные котельные «Киевэнерго»: «Нивки», «Отрадный», «Виноградарь», «Борщаговка»), а также во Львове, Днепропетровске, Харькове и других городах Украины. Массовое внедрение нескольких тысяч таких горелок позволило снизить концентрации NO_x в продуктах сгорания с 220–260 до $130\text{--}160 \text{ мг/м}^3$ (3 % O_2).

К настоящему времени большинство горелочных устройств стадийного сжигания (рис.4) требует капитальных ремонтов и наладки с приведением их показателей к расчетным. Разработаны новые перспективные горелочные устройств стадийного сжигания с каналом вторичного воздуха из огнеупорного материала, которые позволят снизить выбросы оксидов азота при сжигании природного газа до 100 мг/м^3 (3 % O_2) (для некоторых конструкций топочных камер необходимо сочетание с другими методами снижения выбросов NO_x), в том числе

возможна модернизация существующих горелок типа ГДС [10].

Институтом газа НАН Украины разработаны и применены методы интенсификации воздействия газов рециркуляции за счет изменения способа их введения при сжигании природного газа:

а) подача газов рециркуляции не в дутьевой воздух, а в топливный газ — повышает эффективность воздействия газов рециркуляции в 2–3 раза, что позволяет для снижения выхода NO_x в 2 раза вводить в горелочное устройство не 20–25 %, а лишь 7 % газов рециркуляции (практически не снижается КПД котла), а это снижает нагрузку тягодутьевых машин; разработаны принципиально новые горелочные устройства, испытанные и примененные на котлах 100 т/ч пара Северодонецкой ТЭЦ;

б) увеличение подачи газов рециркуляции в центральные горелки и соответствующее снижение подачи их в крайние — повышает интенсивность влияния газов рециркуляции, выход оксидов азота уменьшается на 25–30 %; применен на котлах энергоблоков 200 МВт ТГМП-314А Сургутской ГРЭС-1 и др. [1, 24].

Для промышленных котлов и электростанций, не имеющих рециркуляционного дымохода, отработана и использована на ряде котлов схема перепуска части дымовых газов с дымохода во входной патрубков вентилятора [25, 26].

Оригинальным техническим решением явилось предложение Института газа НАН Украины использовать котлоагрегаты для утилизации вредных примесей воздуха, который сбрасывается в атмосферу от химических и других предприятий. Загрязненный химическим веществом воздух используется в котлах вместо дутьевого.

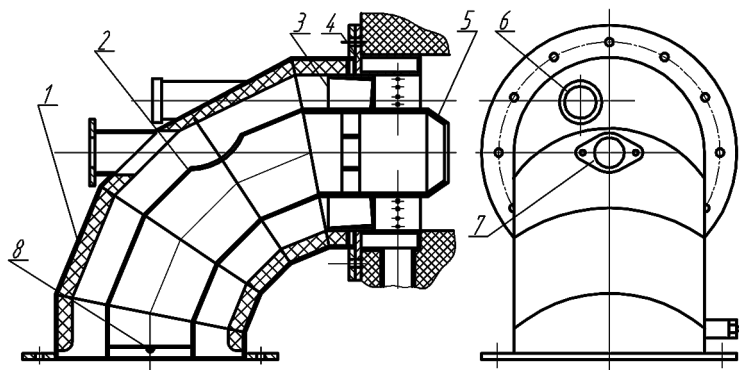


Рис.4. Схема горелочного устройства стадийного сжигания типа ГДС: 1 — корпус; 2 — канал вторичного не закрученного потока воздуха; 3 — лопаточный аппарат; 4 — газовая камера; 5 — коническое сужение канала вторичного воздуха; 6 — окно для визуализации горения; 7 — место для мазутной форсунки; 8 — шибер для регулирования доли вторичного воздуха.

В результате удалось не только практически ликвидировать вредные выбросы промышленных предприятий, но и достичь сокращения расхода топлива [27]. Вслед за этой работой на некоторых предприятиях были применены системы многократного использования воздуха и его очистки в самом технологическом цикле [28], вихревые печи для дожигания токсичных газообразных выбросов [29] и термokatалитические реакторы производительностью 10, 25 и 50 тыс. м³/ч, которые и в настоящее время конкурентноспособны по сравнению с имеющимися на мировом рынке образцами [30].

Современные тенденции и некоторые новые технологии снижения выбросов NO_x

В Европейском Союзе и других высокоразвитых странах задачи по уменьшению загрязнения атмосферного воздуха относятся к самым приоритетным. С целью помощи предприятиям в выполнении директив в ЕС создаются соответствующие справочные базы данных BREF (BAT Reference) относительно наилучших доступных технологий (BAT – The Best Available Technology или Best Available Techniques), которые рекомендуются внедрять для достижения удельных нормативных показателей, в частности, по снижению вредных выбросов от ЛСР (большие установки для сжигания) [31].

В то же время, как было указано выше, превышение допустимой концентрации оксидов азота в атмосферном воздухе в городах Европы, в том числе Украины, является рядовым явлением. Некоторые страны ЕС собираются решить проблему кардинально. Определив, что дизельные двигатели в городах являются одним из крупнейших источников поступления NO_x (наряду с промышленностью), их использование во многих странах уже ограничивают и планируют запретить через некоторое время [12], хотя по сравнению с двигателями, работающими по циклу Отто, они минимум на четверть позволяют сэкономить топливо.

Кроме того, ужесточаются нормы выбросов по оксидам азота при сжигании всех топлив, в частности, при сжигании природного газа для новых котлов средней мощности введено жесткое ограничение на удельную концентрацию оксидов азота в дымовых газах на уровне не выше 100 мг/нм³ (3 % O₂, сухие газы) [32, 33]. Европейские нормы по выбросам NO_x при сжигании природного газа в существующих и новых топливосжигающих установках (ТСУ) Украины (мощность ТСУ – это сумма входящих мощностей всех котлоагрегатов, подключенных к

одной дымовой трубе) в зависимости от их входящей тепловой мощности (N) (O₂ = 3 %, P = = 101,325 кПа, сухие газы) приведены в таблице.

Нормы ЕС по выбросам NO_x в зависимости от мощности ТСУ

| Показатель | Существующие ТСУ, МВт | | | Новые ТСУ, МВт |
|-------------------------------------|-----------------------|------------|--------|----------------|
| | 1 ≤ N ≤ 5 | 5 < N < 50 | 50 ≤ N | 1 ≤ N |
| NO _x , мг/м ³ | 250 | 200 | 100 | 100 |

В Украине накоплен более чем 60-летний опыт широкого использования природного газа в котлах различной мощности. Обобщение опыта по изучению образования NO_x в более 100 котлах для определения концентрации оксидов азота позволяет записать ориентировочную эмпирическую зависимость, мг/нм³:

$$NO_x = A D_{пр}^{0,8} q_T^{0,5} \alpha_T^3 [(1 - K_\delta \delta - K_r r) K_{эф}], \quad (3)$$

где A – коэффициент пропорциональности (для водогрейных котлов мощных котельных на газе A = 27, для котлов электростанций A = 55); D_{пр} – эквивалентный диаметр топочной камеры, D_{пр} = 4 F/U (где F – площадь, м²; U – периметр топочной камеры, м); q_T – тепловое напряжение топочного объема, ГДж/(м³·ч); α_T – коэффициент избытка воздуха на выходе их топки; K_δ – коэффициент, характеризующий эффективность двустадийного горения (K_δ = 0,02); δ – доля воздуха, подаваемого в качестве вторичного, %, δ = 15–20 %; K_r – коэффициент, характеризующий эффективность рециркуляции, K = 0,025–0,075; r – степень рециркуляции, обычно r = 10–20 %; K_{эф} – коэффициент, учитывающий совместное действие двух или нескольких методов подавления образования оксидов азота, K_{эф} = 1,3–2,0.

В эмпирической формуле (3) не учтено возможное увеличение образования NO при воздействии соседних горелок. Это требует дополнительных исследований.

Одним из самых перспективных и эффективных методов снижения образования оксидов азота является подача газов рециркуляции не в воздух, а в природный газ [24]. Однако из-за возможного наличия кислорода в дымовых газах в значительном процентном соотношении предварительное смешение газов рециркуляции и природного газа недопустимо, а при смешении непосредственно в горелочном устройстве невозможно достигнуть их молекулярного перемешивания.

В работе Сигала А.И. и Быкореза Е.И. [34] показано, что в составе газов рециркуляции уже содержится значительная концентрация NO_x , которая оказывает дополнительное положительное влияние на эффективность применения газов рециркуляции.

Как показали результаты исследований на лабораторном стенде [35], при добавлении 7 % CO_2 к природному газу можно достичь 50 %-го снижения концентрации NO_x в продуктах сгорания. Добавка CO_2 к метану при сжигании такой смеси приводит к израсходованию атомарного водорода в реакции $\text{H} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{OH}$ вместо его участия в важной реакции разветвления $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{OH}$, в которой образуется необходимый для синтеза оксида азота атомарный кислород: $\text{N}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$; $\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$. Кроме того, действует тепловой фактор, который связан непосредственно с ростом потерь тепла на излучение в условиях уменьшения скорости горения, при этом адиабатическая температура пламени меньше, что позволяет получить дополнительное снижение NO [36–38].

Выводы

Наблюдаемое превышение допустимых концентраций оксидов азота в атмосферном воздухе крупных городов Украины требует оперативной разработки дорожной карты по их уменьшению. Сохранение существующей ситуации может привести к росту количества заболеваний, а массовый перевод котлов с газа на уголь или другие твердые топлива несмотря на значительное снижение стоимости условной единицы топлива может стать причиной экологической катастрофы.

Снижение выбросов оксидов азота в городах в первую очередь необходимо начать с промышленных предприятий, поскольку их выбросы не соответствуют европейским стандартам и в 2 и более раз выше даже при сжигании природного газа. Причем в зависимости от конструкции котла, срока его эксплуатации, пиковой нагрузки котельной и условий эксплуатации можно применять как традиционные методы снижения концентрации оксидов азота (рециркуляцию, стадийное сжигание и их комбинации), так и подачу газов рециркуляции и природного газа в смеси, которые образуются в горелочном устройстве. Эффективна также добавка CO_2 к природному газу. Потенциальным источником CO_2 могут быть контактные экономайзеры, из кислой воды которых может извлекаться растворенный диоксид углерода для подмешивания его в природный газ перед подачей в горелки котла.

Основные технические решения, заложенные в основу подовых щелевых горелочных устройств, топков котлоагрегатов с двусветными экранами, разработанными в 1950–1970 гг., оказались жизнеспособными и экономически обоснованными, а подавляющее большинство котлоагрегатов, выпущенных за все это время, продолжают эксплуатироваться с приемлемым КПД. Для основных котлов конструкции Института газа НАН Украины (ТВГ-8 и др.) разработаны проекты их модернизации с увеличением КПД до 94–95 % за счет замены горелочных устройств на новые типа МПИГ-3 и установке конвективной части новой конструкции с большей площадью поверхности нагрева.

Список литературы

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л. : Недра, 1988. 313 с.
2. Сигал И.Я. Щелевые подовые газовые горелки для паровых котлов. *Промышленная энергетика*. 1958. № 9. С. 13–16.
3. Михеев В.П., Федоров В.П. Подовые и щелевые горелки для природного газа. Л. : Недра, 1965. 74 с.
4. Сигал И.Я., Смихула А.В., Дубоший А.Н., Домбровская Э.П. Повышение эффективности и продление ресурса котлов типа ПТВМ. Тр XVIII конференции стран СНГ с международным участием «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». (10–14 июня 2008 г., Коренз, Крым). К. : НПЦ «Алкон», 2008. С. 122–126.
5. Смихула А.В. Розробка та дослідження потужних подових щілинних пальників для водогрійних баштових котлів : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 2007. 20 с.
6. Пат. на корисну модель UA 52028 Укр., МПК F 24 D. Пальник для спалювання газу. І.Я.Сигал, О.І. Сигал, А.В.Смихула, Е.М.Лавренцов, Е.П.Домбровська. Заяв. 17.02.2010; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.
7. Лавренцов Е.М., Сигал И.Я., Смихула А.В., Березанский В.В., Овчар В.В. Модернизация водогрейных котлов ТВГ. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 6. С. 70–76.
8. А.с. 173396 СССР МПК F 24 D. Водогрейный котел. И.Я.Сигал, Е.М.Лавренцов, Э.П. Домбровская. № 925898/24-6; заявл. 21.10.1964; опубл. 07.04.1965, Бюл. № 15.
9. Лавренцов Е.М., Сигал И.Я., Смихула А.В., Сигал А.И., Кучин Г.П., Скрипко В.Я., Быкорез Е.И. Реконструкция и модернизация водогрейных и паровых котлов отопительных систем теплоснабжения. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. № 3. С. 63–71.
10. Сигал И.Я., Смихула А.В., Марасин О.В., Лавренцов Е.М., Домбровська Е.П. Модернізація газових котлів ТЕС, ТЕЦ та котельні до вимог екологічних директив ЄС. *Енерготехнологии и ресурсосбережение*. 2017. № 4. С. 61–70.

11. Сміхула А.В., Сігал І.Я., Бондаренко Б.І., Семеник Н.І. Технології зниження шкідливих викидів до атмосфери тепловими електростанціями та котельними великої і середньої потужності України. Київ : ФОП Маслаков, 2019. 108 с.
12. Bart Degraeuwe et al. (2017) Impact of passenger car NO_x emissions on urban NO₂ pollution. Scenario analysis for 8 European cities, Atmospheric Environment, No. 171, pp. 330–337.
13. Иванов В.П., Иванова Н.В., Полоников А.В. Медицинская экология : Учеб. для мед. вузов. СПб. : СпецЛит, 2012. 320 с.
14. Сігал І.Я., Гуревич Н.А.. Оценка влияния различных источников газовых выбросов на загрязнение атмосферного воздуха. *Укр. хим. журн.* 1971. № 2. С. 140–145.
15. Сігал І.Я., Марковский А.В., Гуревич Н.А., Нижник С.С. Образование окислов азота в топках котельных агрегатов. *Теплоэнергетика*. 1971. № 4. С. 57–60.
16. Сігал І.Я., Нижник С.С., Гуревич Н.А., Марковский А.В. Образование окислов азота в топочных процессах при сжигании газа. Теория и практика сжигания газа. Л. : Недра, 1972. Т. VI. С. 321–330.
17. Sigal I.J. Die Stickoxydemission aus Kraftwerkessel. *Archiv fuer Energie Wirtschaft*, 1972. Heft 2. S. 282–288.
18. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1947. 145 с.
19. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. 13th Symposium on Combustion. Pittsburgh : Combustion Institute. 1971. P. 373–380. — [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1)
20. Cui Q., Morokuma K., Bowman J.M. et al, The spin-forbidden reaction CH(2P)+N₂ → HCN+N(4S) revisited. II. Nonadiabatic transition state theory and application. *The Journal of Chemical Physics.. American Institute of Physics*, 1999. Vol. 110, № 19. P. 9469–9482. — <https://doi.org/10.1063/1.478949>
21. Moskaleva L.V., Lin M.C. The spin-conserved reaction CH + N₂ → H + NCN: A major pathway to prompt NO studied by quantum/statistical theory calculations and kinetic modeling of rate constant. Proceedings of the Combustion Institute. Elsevier, 2000. Vol. 28, № 2. P. 2393–2402. — [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80652-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80652-9)
22. Lamoureux N., Desgroux P., El Bakali A., Pauwels J.F. Experimental and numerical study of the role of NCN in prompt-NO formation in low-pressure CH₄-O₂-N₂ and C₂H₂-O₂-N₂ flames. *Combustion and Flame*. Elsevier, 2010. Vol. 157, № 10. P. 1929–1941. — <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.03.013>
23. А.с. 1206558 СССР, МКИ⁴, F 23 D 14/00. Горелочное устройство. Г.Ф.Найденев, А.Д.Горбаненко, Ю.П.Енякин, А.С.Куц, И.Я.Сігал. Опубл 23.01.1986, Бюл. 3.
24. Сігал І.Я., Дубошій А.Н., Сігал А.И., Сміхула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выброса оксидов азота котлами электростанций. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2010. № 1. С. 48–52.
25. Сігал І.Я., Сміхула А.В., Марасин А.В., Лавренцов Е.М. Продление ресурса промышленных и отопительных котлов от 12 МВт котельных и ТЭЦ. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2015. № 3. С. 46–53.
26. Сігал І.Я., Нижник С.С. Зменшення утворення оксидів азоту рециркуляцією продуктів згоряння. *Цукор України*. 1994. № 3. С. 14–16.
27. Сігал І.Я., Найденев Г.Ф., Гуревич Н.А. Использование котлоагрегатов для очистки отбросных газов химических предприятий. *Энергетика и электрификация*. 1966. № 6. С. 46–48.
28. Гуревич Н.А., Аксенов В.Л. Многократное использование воздуха в системах термического обезвреживания выбросов. В кн.: Обезвреживание технологических отходов в производстве синтетических моющих средств. Киев: Изд-во О-ва «Знание», 1977. С. 78–79.
29. Данилевич Ю.И., Юрко В.А., Пухляк Б.Е. Термическая очистка газовых выбросов при производстве олифы. В кн.: Новые технологические процессы на предприятиях местной промышленности. Киев : Тэхника, 1976. С. 53–55.
30. Марковский А.В., Марченко Г.С., Возняк Д.М. Термокаталитический реактор для обезвреживания газовых промышленных выбросов. Киев : УкрНИИИТИ, 1977. № 77. С. 1–4.
31. Thierry Lecomte et al. (2017). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants, Publications Office of the European Union, 986 p.
32. Directive 2010/75/EU (2010). Of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), *Official Journal of the European Union*, 2010, 17 December, 119 p.
33. Directive (EU) 2015/2193 (2015). 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. *Official Journal of the European Union*, 2015, 28 November, 19 p.
34. Сігал О.І., Бикорізі Є.Й. Вплив вологи, як складової топкових баластів на процес утворення окислів азоту. В кн.: Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Севастополь, 2005. С. 37–44.
35. Сігал І.Я., Сміхула А.В., Дубошій А.Н., Горбунов А.В., Горбунов А.А. Снижение образования оксидов азота при сжигании природного газа. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2016. № 4. С. 44–51.
36. Гуревич Н.А. Химическое влияние добавки СО₂ на скорость горения метана по теории Зельдовича. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2011. № 5. С. 3–10.
37. Galmiche B., Halter F., Foucher F., Dagaut P. Effects of Dilution on Laminar Burning Velocity of Premixed Methane/Air Flames. *Energy and Fuels*. 2011. Vol. 25. P. 948–954.
38. Liu F., Guo H., Smallwood G. J. The Chemical Effect of CO₂ Replacement in Air on the Burning Velocity of CH₄ and H₂ Premixed Flames. *Combustion and Flame*. 2003. Vol. 133. P. 495–497.

Сігал І.Я.¹, докт. техн. наук, проф., **Сміхула А.В.¹**, канд. техн. наук,
Сігал О.І.², канд. техн. наук

¹ **Інститут газу НАН України, Київ**

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

² **Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ**

вул. Желябова, 2а, 03680 Київ, Україна, e-mail: office@engecology.com

Досвід розробки пальникових пристроїв, топкових камер і технологій зниження викидів оксидів азоту при спалюванні природного газу в котельних агрегатах

Розглянуто особливості конструктивних рішень, закладених у пальникові та топкові камери котлоагрегатів, які застосовуються як при переведенні твердопаливних котлів на природний газ, так і створенні нових конструкцій газових котлоагрегатів. Показано, що у роботах по зниженню викидів оксидів азоту, розпочатих в Інституті газу ще у 1960-х рр., вже у 1971 році були досягнуті значні результати. Розглянуто основні методи та технічні рішення, які застосовуються для зниження викидів оксидів азоту при спалюванні природного газу на котлах різної потужності, в тому числі енергоблоків 300 МВт. Наведено принципову конструкцію пальникового пристрою стадійного спалювання, яка використовується в Україні та країнах СНД у кількості більше 2000 одиниць. Показано, що встановлені пальники стадійного спалювання природного газу вимагають негайної реконструкції з приведенням їх показників на першому етапі до розрахункових, а на другому можлива їх модернізація для досягнення вказівок директиви ЄС 2010/75/EU щодо викидів. Показано найбільш перспективні технології подальшого зниження рівня викидів оксидів азоту нижче 100 мг/нм³ (3% O₂, сухі гази) при спалюванні природного газу. Бібл. 38, рис.4, табл.1.

Ключові слова: котли, оксиди азоту, горіння, топка, пальник.

Sigal I.Ya.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Smikhula A.V.¹, Candidate of Technical Sciences,

Sigal O.I.², Candidate of Technical Sciences

¹ **The Gas Institute of NAS of Ukraine, Kyiv**

39, Degtjarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

² **Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kyiv**

2-a Zhelyabova Str., 03057 Kyiv, Ukraine, e-mail: office@engecology.com

Experience of the Development of Burners, Chambers and Technologies for Reducing Emissions of Nitrogen Oxides by Boilers During the Combustion of Natural Gas

In the article discusses the features of constructive solutions accepted in the burner devices and chambers of boiler units, which were used both when converting solid fuel boilers to natural gas, and creating new designs of gas boiler units. The works to reduce nitrogen oxide emissions at the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine began in the 1960s and by 1971 significant results had been achieved was shown. The main methods and technical solutions that are used to reduce emissions of nitrogen oxides during the combustion of natural gas in boilers of various capacities, including 300 MW power units, are considered. The principal design of a two-stage burner, which are operated in an amount of more than 2000 units in Ukraine and the CIS countries is presented. The installed two-stage burner devices for combustion of natural gas require immediate reconstruction with bringing their indicators to the calculated ones at the first stage. The modernization of the exist-

ing two-stage burners is possible to achieve the readings of the EU emissions directive 2010/75/EU was shown. The most promising technologies for further reducing the level of nitrogen oxide emissions less than 100 mg/Nm³ (3 % O₂, dry gases) when burning natural gas were shown. *Bibl. 38, Fig. 4, Tab. 1.*

Key words: boilers, nitrogen oxides, combustion, chamber, burner.

References

1. Sigal I.Ya. [Protection of ambient air at fuel burning]. Leningrad : Nedra., 1988. 313 p. (Rus.)
2. Sigal I.Ya. [Slot bottom gas burners for steam boilers]. *Promyshlennaya energetika*. 1958. No. 9. pp. 13–16. (Rus.)
3. Mikheev V.P., Fedorov V.P. [Hearth and slot burners for natural gas]. Leningrad : Nedra, 1965. 74 p. (Rus.)
4. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Duboshiy A.N., Dombrovskaya E.P. [Improving the efficiency and extending the resource of PTVM-type boilers]. *Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities: Tr. XVIII Conference of the CIS Countries with International Participation*. (10–14 June 2008, Koreiz, Krym). Kiev : CPI Alkon, 2008. pp. 122–126. (Rus.)
5. Smikhula A.V. Development and research of power bottom slot burners for tower hot water boilers : Abstract of the dissertation. Kiev, 2007. 20 p. (Ukr.)
6. Utility model patent UA 52028. MPK F 24 D. [Burner for gas burning]. I.Ya.Sigal, O.I.Sigal, A.V. Smikhula, E.M.Lavrentsov, E.P.Dombrovskaya u201001705; zajavl. 17.02.2010; Publ. 10.08.2010, Bull. 15. (Ukr.)
7. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Bezanskiy V.V., Ovchar V.V. [Water Boilers of TVG and KVG Types Modernization]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2010. No. 6. pp. 70–76. (Rus.)
8. Gas-fired heat-water supply boiler. Sigal I.Ya., Lavrentsov E.M., Dombrovskaya E.P. Certificate of authorship 173396 USSR: MPK F 24 D. 925898/24-6; zajavl. 21.10.1964; Publ. 07.04.1965, Bull. 15. (Rus.)
9. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Sigal A.I., Kuchin G.P., Skripko V.Ya., Bykorez E.I. Reconstruction and Modernization of Water-Heating and Steam Boilers in Heat-Systems. *Energotekhnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 3. pp. 63–71. (Rus.)
10. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Marasin O.V., Lavrentsov E.M., Dombrowska E.P. [Modernization of gas boilers of TPP, CHP and boilers rooms to the EU directive ecological requirements]. *Energotekhnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 4, pp. 61–70. — <https://doi.org/10.33070/etars.4.2017.09> (Ukr.)
11. Smikhula A.V., Sigal I.Ya., Bondarenko B.I., Semeniuk N.I. [Technologies for reduction of harmful emissions to the atmosphere of thermal power plants and boiler-houses of large and medium power of Ukraine]. Kiev: FOP Maslakov, 2019. 108 p. (Ukr.)
12. Bart Degraeuwe et al. Impact of passenger car NO_x emissions on urban NO₂ pollution – Scenario analysis for 8 European cities. *Atmospheric Environment*. 2017. No. 171. pp. 330–337.
13. Ivanov V.P., Ivanova N.V., Polonikov A.V. [Medical ecology : Textbook for medical schools]. St. Petersburg : SpetsLit, 2012. 320 p. (Rus.)
14. Sigal I.Ya., Gurevich N.A. [Assessment of the impact of various sources of gas emissions on air pollution]. *Ukrain. Chem. J.* 1971. No. 2. pp. 140–145. (Rus.)
15. Sigal I.Ya., Markovsky A.V. Gurevich N.A., Nizhnik S.S. [The formation of nitrogen oxides in the furnaces of boiler units]. *Teploenergetika*. 1971. No. 4. pp. 57–60. (Rus.)
16. Sigal I.Ya., Nizhnik S.S., Gurevich N.A., Markovsky A.V. [The formation of nitrogen oxides in furnace processes during gas combustion. Theory and practice of gas combustion. Leningrad : Nedra, 1972. Vol. 6. pp.321–330. (Rus.)
17. Sigal I.J. Die Stickoxydemission aus Kraftwerkessel. *Archiv fur Energie Wirtschaft*, 1972. Vol. 2. pp. 282–288. (De)
18. Zeldovich Ya.B, Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamenetskiy D.A. [Formation of Nitric Oxide Following Combustion]. Moscow; Leningrad : Acad. Sci. SSSR, 1947. 145 p. (Rus.)
19. Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in pre-mixed hydrocarbon flames. *The 13th Symposium on Combustion. Pittsburgh* : Combustion Institute. 1971. pp. 373–380. — [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80040-1](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80040-1)
20. Cui Q., Morokuma K., Bowman J.M., Klippenstein S.J. The spin-forbidden reaction CH(2P) + N₂ → HCN + N(4S) revisited. II. Nonadiabatic transition state theory and application. *The Journal of Chemical Physics*. American Institute of Physics. 1999. 110 (19). pp. 9469–9482. — <https://doi.org/10.1063/1.478949>
21. Moskaleva L.V., Lin M.C. The spin-conserved reaction CH + N₂ → H + NCN: A major pathway to prompt NO studied by quantum/statistical theory calculations and kinetic modeling of rate constant. *Proceedings of the Combustion Institute*. Elsevier, 2000. 28 (2). pp. 2393–2402. — [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80652-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80652-9)
22. Lamoureux N., Desgroux P., El Bakali A., Pauwels J. F. Experimental and numerical study of the role of NCN in prompt-NO formation in low-pressure CH₄-O₂-N₂ and C₂H₂-O₂-N₂ flames. *Combustion and Flame*. 2010. 157 (10). pp. 1929–1941. — <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.03.013>

23. Burner device. Naydenov G.F., Gorbanenko A.D., Yenyakin Yu.P., Kushch A.S., Sigal I.Ya. Certificate of authorship 1206558 USSR: MPK F 23 D 14/00. 3566042/24-06; zajavl. 21.03.1983; Publ. 23.01.1986, Bull. 3. (Rus.)
24. 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]. *Energotechnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2010. No. 1. pp. 48–52. (Rus.)
25. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Marasin O.V., Lavrentsov E.M. [The increasing duration of operation of boiler houses and heat electro power stations above 12 MW in Ukraine]. *Energotechnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2015. No. 3. pp. 46–53. (Rus.)
26. Sigal I.Ya., Nignik S.S. [Reduction of formation of nitrogen oxides by recirculation of combustion products]. *Tsukor Ukraini*. 1994. No. 3. pp. 14–16. (Ukr.)
27. Sigal I.Ya., Naydenov G.F., Gurevich N.A. [The use of boiler units for the treatment of waste gases from chemical enterprises]. *Energetika i elektrifikatsiya*. 1966. No. 6. pp. 46–48. (Rus.)
28. Gurevich N.A., Aksyonov V.L. [The multiple use of air in systems for the thermal treatment of emissions / In the book [Neutralization of technological waste in the production of synthetic detergents]. Kiev : Izdatelstvo obshchestva «Znanie», 1977. pp. 78–79. (Rus.)
29. Danilevich Yu.I., Yurko V.A., Pukhlyak B.E. [Thermal purification of gas emissions during the production of drying oil]. In the book [New technological processes at the enterprises of local industry]. Kiev : Tekhnika, 1976. pp. 53–55. (Rus.)
30. Markovsky A.V., Marchenko G.S., Wozniak D.M. [Thermocatalytic reactor for the neutralization of industrial gas emissions]. Kiev : UkrNIINTI, 1977. No. 77. pp. 1–4. (Rus.)
31. Thierry Lecomte et al. (2017). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants, Publications Office of the European Union, 986 p.
32. Directive 2010/75/EU (2010). Of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), *Official Journal of the European Union*, 2010, 17 December, 119 p.
33. Directive (EU) 2015/2193 (2015). 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. *Official Journal of the European Union*. 2015, 28 November, 19 p.
34. Sigal O.I., Bykoriz E.Y. [The effect of moisture, as a component of gas ballast of furnace on the formation of nitrogen oxides]. In: Problemi ekologii i ekspluatatsii obektov energetiki. Sevastopol, 2005. pp. 37–44. (Ukr.)
35. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Duboshiy O.M., Horbunov O.V., Horbunov A.O. [Reducing the formation of nitrogen oxides during the combustion of natural gas]. *Energotechnologii i resurso sberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2016. No. 4. pp. 44–51. (Rus.)
36. Gurevich N.A. [The chemical effect of CO₂ addition on methane burning velocity by Zel'dovich theory]. *Energotechnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2011. No. 5. pp. 3–10. (Rus.)
37. Galmiche B., Halter F., Foucher F., Dagaut P. Effects of Dilution on Laminar Burning Velocity of Premixed Methane. *Air Flames. Energy and Fuels*. 2011. Vol. 25. pp. 948–954.
38. Liu F., Guo H., Smallwood G. J. The Chemical Effect of CO₂ Replacement in Air on the Burning Velocity of CH₄ and H₂ Premixed Flames. *Combustion and Flame*. 2003. Vol. 133. pp. 495–497.

Received 3, July 2019

До 90-річчя з Дня народження А.Є.Єринова



Шана вчителю

Єринов Анатолій Єремійович (1929–2003 рр.), доктор технічних наук, професор, автор понад 420 наукових праць, один з фундаторів вітчизняної школи промислової теплотехніки, народився у м. Дніпропетровську 2 серпня 1929 р.

Закінчив Дніпропетровський металургійний інститут, захистив кандидатську та докторську дисертації в Інституті газу Національної академії наук України (м. Київ). Багато років Анатолій Єремійович був завідувачем відділу проблем промислової теплотехніки в Інституті газу, в якому він працював з 1952 р. по 2003 р.

У цьому році його учні, послідовники, друзі та близькі зібралися, аби вшанувати його пам'ять.

Людина обдарована світлим розумом, сміливою думкою, азартом дослідника, талантом інженера, почуттям гідності та відповідальності, унікальним почуттям такту, він залишив по собі добру пам'ять та вагомі досягнення у галузі пічної теплотехніки: у дослідженнях закономірностей течії, змішування струменів газового палива та повітря, у розробці різноманітних газопальникових пристроїв для широкого спектру технологій нагрівання матеріалів та виробів у промислових печах, у процесах позапічної обробки зварних швів великогабаритних багат шарових посудів.

Під його керівництвом виконані доказові теоретичні та експериментальні роботи з інтенсифікації процесів конвективного теплообміну при організації процесів горіння на поверхні та у швидкісних струменях підготовлених сумішей газу з повітрям. Ці дослідження стали основою розробки печей, які працюють у режимах непрямого та сумісного теплообміну, плоскополумєневих пальників для них, радіаційних труб та печей для нагрівання металу в захисних атмосферах, швидкісних пальників для здійснення інтенсивної внутрішньої рециркуляції газового середовища печей та інших агрегатів.

Він був активним прихильником «енергетичної» теорії печей академіка М.М.Доброхотова, учнем академіка В.Ф.Копитова, Н.Ю.Тайца, однодумцем М.А.Глінкова, А.С.Невського, другом Ю.І.Іванова, І.Д.Семикина, Ю.Г.Ярошенка та багатьох інших відомих теплотехніків

Розробки, виконані під його керівництвом, були впроваджені на сотнях печей Радянського Союзу, у США, Угорщині, Алжирі, Болгарії, Польщі за його життя, продовжують розроблятися та впроваджуватися зараз його учнями та послідовниками.

Вічна пам'ять та шана Громадянину, Вченому, Вчителю та Другу!

*Співробітники відділу проблем промислової теплотехніки
Інституту газу НАН України, учні та аспіранти А.Є.Єринова*