

УДК 538.9:536.6

Технические науки

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор,  
заведующая отделом теплофизики энергоэффективных теплотехнологий,  
член корреспондент НАН Украины,  
Заслуженный деятель науки и техники Украины  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Honored Worker of Science and Technology of Ukraine,  
Head of the Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat  
Technologies Corresponding Member of NAS of Ukraine  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Прокопов Виктор Григорьевич**

*доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник  
отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Prokopov Victor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Навродская Раиса Александровна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник  
отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Navrodskaia Raisa**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher of the  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Шевчук Светлана Ивановна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Shevchuk Svetlana**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher of the  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Степанова Алла Исаевна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
отдела теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Stepanova Alla**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Leading Researcher of the  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЫМОВЫХ  
ТРУБ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С СИСТЕМАМИ  
ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИИ**

## IMPROVING THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF CHIMNEYS OF BOILER PLANTS WITH HEAT RECOVERY SYSTEMS

***Аннотация.** Изложены результаты исследований теплотехнических и экологических параметров выбросов дымовых труб газопотребляющих котельных установок, оснащенных системами глубокой утилизации теплоты отходящих газов. Рассмотрены вопросы целесообразности применения тепловых методов предотвращения конденсатообразования в дымовых трубах для повышения их экологичности. Это методы частичного байпасирования отходящих газов котла мимо теплоутилизационного оборудования, подсушивания охлажденных после теплоутилизации дымовых газов в теплообменниках-газоподогревателях и подмешивания к этим газам сухого и нагретого воздуха от воздухоподогревателя котельной. Проанализирована эффективность использования этих методов с целью улучшения экологических показателей дымовых труб. Определено относительное уменьшение максимальной приземной концентрации таких вредных выбросов, как оксиды азота и углерода за счет использования указанных тепловых методов. Выполнено сопоставление эффективности применения данных методов для улучшения экологичности рассматриваемых дымовых труб. Показано, что предлагаемые методы, применяемые для антикоррозионной защиты дымовых труб котельных установок при использовании теплоутилизационных технологий с глубоким охлаждением дымовых газов, способствуют повышению экологичности этих труб.*

***Ключевые слова:** газопотребляющие котлы, глубокое охлаждение отходящих газов, снижение вредных выбросов, тепловые методы.*

***Summary.** The researches results of thermotechnical and environmental parameters of emissions from chimneys of gas-fired boiler plants equipped with*

*systems for deep heat recovery of exhaust gas are presented. The issues of the expediency of using heat methods for preventing condensation formation in chimneys to improve their environmental friendliness are considered. These are methods of partial bypassing of boiler exhaust gases past the heat recovery equipment, predrying the exhaust gases cooled after heat recovery in heat exchangers-gas heaters and mixing dry and heated air from the boiler room air heater to these gases. The efficiency of using these methods in order to improve the environmental performance of chimneys is analyzed. A relative decrease in the maximum surface concentration of such harmful emissions as nitrogen and carbon oxides due to the use of these heat methods has been determined. Comparison of the effectiveness of the application of these methods to improve the environmental friendliness of the considered chimneys is carried out. It is shown that the proposed methods used for anticorrosion protection of chimneys of boiler plants when using heat recovery technologies with deep cooling of flue gases contribute to an increase in the environmental friendliness of these chimneys.*

**Key words:** *gas-fired boilers, deep exhaust-gas cooling, reduction of harmful emissions, heat methods.*

Дымовые трубы являются важными элементами топливоиспользующих теплоэнергетических установок различного назначения и служат для безопасного удаления отработанных продуктов сгорания (отходящих дымовых газов) в окружающую среду. Поэтому к ним при проектировании и эксплуатации выдвигаются высокие требования относительно их надежности и экологичности, связанной с соблюдением нормативных показателей рассеивания в атмосфере вредных веществ.

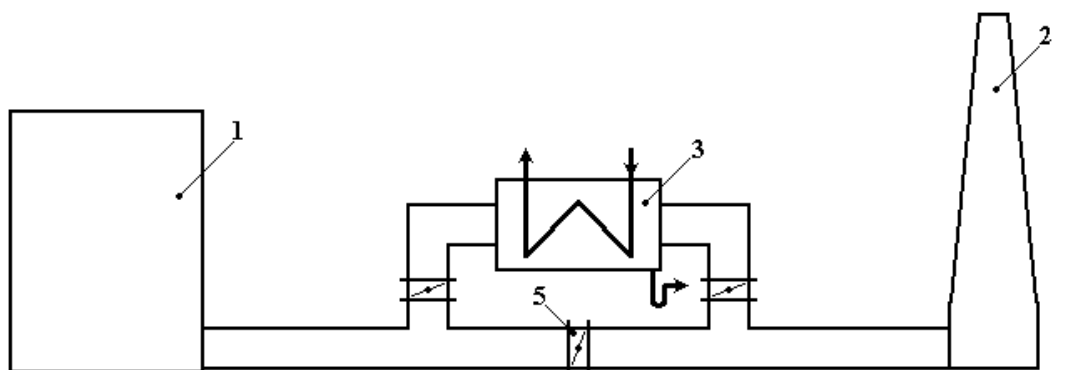
Помимо необходимости безопасности и экологичности дымовых труб к современным теплоэнергетическим установкам выдвигаются требования относительно экономии топлива, то есть повышения их КПД

или коэффициента использования теплоты топлива КИТТ, что обычно реализуется путем применения различных теплоутилизационных технологий [1-5]. Применение таких технологий зачастую приводит к отклонению условий эксплуатации дымовых труб от нормативных. Эти отклонения имеют как позитивные последствия (уменьшение температуры выбрасываемых газов и объемов вредных веществ), так и негативные – нарушение режимов работы дымовых труб касательно их безопасности и условий рассеивания загрязняющих веществ. Безопасность дымовых труб ухудшается при глубокой теплоутилизации дымовых газов вследствие коррозионного разрушения оболочки труб из-за уменьшения температуры их внутренней поверхности ниже точки росы содержащегося в дымовых газах водяного пара [5-9]. Поэтому при проектировании и эксплуатации теплоутилизационных технологий для топливоиспользующих теплоэнергетических установок должны применяться мероприятия относительно улучшения экологичности и надежности их дымовых труб.

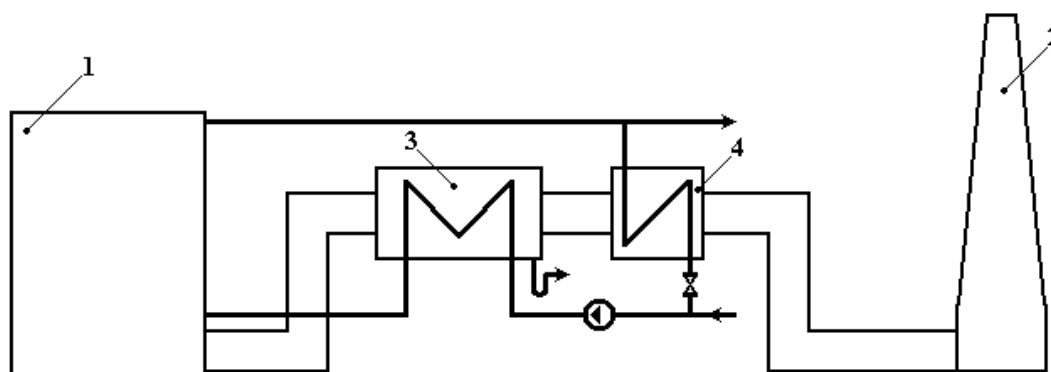
Данная работа посвящена исследованию целесообразности применения тепловых методов предотвращения конденсатообразования в дымовых трубах различного типа для улучшения их экологичности. Проанализирована эффективность использования с целью улучшения экологических показателей дымовых труб таких тепловых методов, как: частичное байпасирование с долей  $\chi$  отходящих газов котла мимо теплоутилизационного оборудования, подсушивание (подогревание на величину  $\Delta t$ ) охлажденных после теплоутилизации дымовых газов в теплообменниках-газоподогревателях, подмешивание к охлажденным газам части  $\sigma$  сухого и нагретого воздуха от воздухоподогревателя котельной. Схемы соответствующих котельных установок с применением указанных тепловых методов приведены на рис.1.

Рассматривались теплотехнические параметры (температура и скорость дымовых газов) отопительных котельных установок номинальной

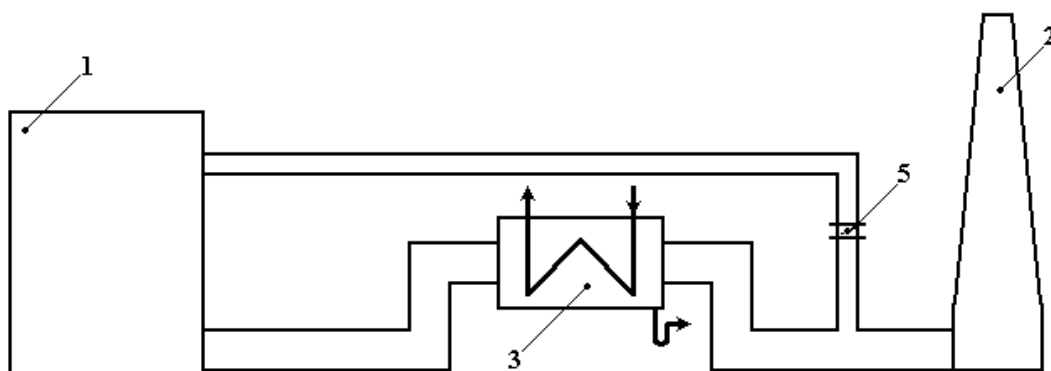
теплопроизводительностью 2 МВт, оснащенных теплоутилизаторами для нагревания теплосетевой воды. Данные параметры определялись на выходе из устья дымовых труб разного типа (металлической и кирпичной).



а)



б)



в)

**Рис. 1. Принципиальные схемы котельных установок с применением трех тепловых методов: байпасирования (а), подсушивания в газоподогревателе (б) и подмешивания сухого нагретого воздуха (в):**

1 – котел; 2 – дымовая труба; 3 – конденсационный водонагреватель; 4 – газоподогреватель; 5 – шибер

Изучалось влияние указанных параметров на уменьшение максимальной приземной концентрации у дымовой трубы таких вредных выбросов, как оксиды азота  $\text{NO}_x$  и углерода  $\text{CO}$ , при использовании предлагаемых тепловых методов. Исследования экологических показателей проводилось в соответствии с методическими рекомендациями [10]. При этом определялось относительное уменьшение  $C_{\text{от}}^{\text{CO}}$  и  $C_{\text{от}}^{\text{NO}_x}$  указанных концентраций при применении методов  $C_m$  по сравнению с ситуацией без их применения  $C_o$ :

$$C_{\text{от}}^{\text{NO}_x} = (C_o^{\text{NO}_x} - C_m^{\text{NO}_x}) / C_o^{\text{NO}_x} \cdot 100\%,$$

$$C_{\text{от}}^{\text{CO}} = (C_o^{\text{CO}} - C_m^{\text{CO}}) / C_o^{\text{CO}} \cdot 100\%.$$

Расчеты осуществлялись для кирпичной и металлической из антикоррозионного материала дымовых труб высотой 45 м, расположенных в Украине в зоне южнее  $50^\circ$  южной широты. Расчетная масса вредного вещества, которая выбрасывается в атмосферу в единицу времени, составила  $M = 1,11 \dots 0,25$  г/с; коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосфере для газов и коэффициент влияния рельефа местности (для равной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающих 50 м на 1 км) принимались равными единице, расчетные безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода дымовых газов из устья трубы составляли  $m = 0,98 \dots 1,23$  и  $n = 1,14 \dots 1,87$ ; разница  $\Delta t$  между температурой отходящих газов  $t_r$  и температурой окружающей среды  $t_{\text{oc}}$  менялась в пределах  $40 \dots 114^\circ\text{C}$ .

Исследования выполнялось в различных режимах работы котлов на протяжении отопительного периода в соответствии с температурой наружного воздуха  $t_n$ . Расчеты производились при соблюдении проектных значений тепловой нагрузки котельных. Режимы работы соответствовали теплосетевому графику котельной с температурным перепадом  $\Delta t = 115-70^\circ\text{C}$ . В случае уменьшения ниже 50% тепловой нагрузки котлов

уменьшалось количество рабочих котлов при соответствующем увеличении их тепловой мощности; температура отходящих дымовых газов за котлом в номинальном режиме составляла 166 °С. Температура подмешиваемого воздуха принималась равной 150 °С. Уровни байпасирования горячих газов  $\chi$ , подмешивания воздуха  $\sigma$  и нагревания охлажденных газов  $\Delta t$  принимались в практическом диапазоне значений, необходимых для отсутствия конденсатообразования в дымовой трубе [7].

Нормативное значение максимальной приземной концентрации (предельно допустимой нормы концентрации ПДК) принималось по данным работы [10] и равнялось 5 мг/м<sup>3</sup> для CO, а для NO<sub>x</sub> – 0,085 мг/м<sup>3</sup>. Значения концентраций выбросов CO и NO<sub>x</sub> в дымовых газах за котлом принимались согласно режимными картами обследованных авторами статьи котлов, эксплуатируемых в коммунальных котельных и соответствуют современным требованиям. Так, максимальная концентрация CO не превышала 0,01 мг/м<sup>3</sup>. Относительно содержания окислов азота  $C_r^{NO_x}$  в дымовых газах за котлом, то выполнен анализ показал, что для подавляющего большинства котлов это содержание менялось в пределах 50-200 мг/м<sup>3</sup>. Наибольшее значение концентрации  $C_r^{NO_x} = 200$  мг/м<sup>3</sup> соответствует согласно действующим нормам допустимой границы выбросов оксидов азота для газопотребляющих котельных установок.

В таблице 1 представлены основные результаты проведенных исследований. Как свидетельствуют полученные данные, применение предлагаемых тепловых методов приводит к улучшению условий эксплуатации дымовых труб. Так, наблюдается рост скорости, и особенно температуры дымовых газов, на выходе из устья дымовых труб по сравнению с ситуацией без использования данных методов. При этом величина относительного уменьшения выбросов колеблется от 1,5 до 32 % в зависимости от режима работы котла, применяемого метода и его



характеристик (долей байпасирования горячих газов  $\chi$ , подмешивания нагретого воздуха  $\sigma$  и уровня нагревания охлажденных газов  $\Delta t$ ).

Таблица 1

**Показатели эффективности применяемых тепловых методов для улучшения экологичности дымовых труб**

Наименование исследуемых показателей	Температура наружного воздуха, °C	Наименование применяемого метода и его характеристик для двух типов материала корпуса дымовых труб											
		Байпасирование с долей $\chi$ горячих газов котла в смеси перед дымовой трубой				Воздушный метод с долей $\sigma$ горячего воздуха в смеси перед дымовой трубой				Подсушивание с подогревом газов в газоподогревателе на величину $\Delta t$ , °C			
		Кирпич		Металл		Кирпич		Металл		Кирпич		Металл	
		$\chi=5$ %	$\chi=15$ %	$\chi=30$ %	$\chi=50$ %	$\sigma=4$ %	$\sigma=12$ %	$\sigma=16$ %	$\sigma=20$ %	$\Delta t=5$ °C	$\Delta t=10$ °C	$\Delta t=20$ °C	$\Delta t=40$ °C
Температура дымовых газов на выходе из устья трубы $t_r$ , °C	-10	74,5	81,6	90,3	105,3	74,0	79,8	79,4	82,1	75,9	80,8	88,1	107,0
	0	60,1	68,0	77,8	93,	59,8	66,1	67,4	70,0	61,0	65,9	73,6	92,4
	10	50,1	52,4	54,7	59,4	52,8	59,6	61,1	63,9	53,8	58,5	66,3	84,6
Скорость дымовых газов на выходе из устья трубы $V_r$ , м/с	-10	8,6	8,8	9,0	9,4	8,9	9,7	10,0	10,4	8,7	8,8	9,0	9,5
	0	5,8	5,9	6,1	6,3	6,0	6,5	6,7	7,0	5,8	5,9	6,0	6,3
	10	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,5	3,7	3,8	3,1	3,2	3,2	3,4
Относительное уменьшение выбросов оксидов азота и углерода $C_{\text{ог}}^{\text{NOx}}$ , $C_{\text{ог}}^{\text{CO}}$ , %	-10	2,8	8,2	15,2	23,4	5,2	14,0	17,8	21,2	3,9	7,5	13,8	24,2
	0	3,9	10,9	19,4	28,7	6,2	16,3	20,5	24,3	4,9	9,3	16,7	28,6
	10	1,5	4,4	8,5	13,6	6,9	17,9	22,2	26,2	5,8	10,9	19,1	31,7

Общими тенденциями для всех применяемых методов и дымовых труб является увеличение уровня относительного уменьшения выбросов с ростом температуры окружающей среды (что соответствует уменьшению тепловой нагрузки котла) и ростом величин  $\chi$ ,  $\sigma$  и  $\Delta t$ .

Следует отметить для металлической дымовой трубы вследствие большего уровня охлаждения дымовых газов в ней при прочих равных условиях величины  $C_{от}^{CO}$  и  $C_{от}^{NOx}$  меньше, нежели для кирпичной.

Что касается ранжирования применяемых тепловых методов, то для рассматриваемых условий, наиболее предпочтительным представляется метод нагревания дымовых газов в газоподогревателе, особенно при высоких уровнях подогрева  $\Delta t$ , а наименьшей эффективностью характеризуется метод байпасирования дымовых газов. Последний метод имеет наименьшие значения величин  $C_{от}^{CO}$  и  $C_{от}^{NOx}$  при высоких температурах окружающей среды, вследствие уменьшения температуры байпасированных дымовых газов котла при уменьшении его нагрузки.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что предлагаемые тепловые методы, применяемые для антикоррозионной защиты дымовых труб котельных установок при использовании современных теплоутилизационных технологий с глубоким охлаждением дымовых газов, способствуют повышению экологичности этих труб.

### **Литература**

1. Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Гнедаш Г.О., Шевчук С.І., Дашковська І.Л. Підвищення ефективності комплексних теплоутилізаційних систем для підігрівання та зволоження дуттьового повітря газоспоживальних котлоагрегатів // Промислова теплотехніка, 2018. №40(3). С. 38-45. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06>
2. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А., Пресич Г. А., Степанова А. И., Шевчук С. И. Повышение эффективности котельных

- установок коммунальной теплоэнергетики путем комбинированного использования теплоты отходящих газов // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 15. С. 126-129.
3. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Пресіч Г.О., Гнедаш Г.О., Шевчук С.І., Степанова А.І. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики. Київ: Типографія «Про формат». 2019. 192 с.
  4. Навродська, Р. О. Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної теплоенергетики // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. №25(9). С. 225-229.
  5. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики // *Промышленная теплотехника*. 2014. № 4. С. 27-36.
  6. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Пресіч Г.О., Меранова Н.О. Дослідження режимів роботи димових труб котелень за умов глибокого охолодження газів // *Промышленная теплотехника*. 2003. № 4. С. 72-74.
  7. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Степанова А. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок Киев: Типография «Про формат», 2018. 248 с.
  8. Навродська Р. О. Запобігання конденсатоутворенню у димових трубах за зниження теплового навантаження котелень // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. №25(9). С. 307-312.
  9. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А., Глушак О. Ю. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок с глубоким охлаждением дымовых газов //

Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии.  
2014. №2. С. 13-17.

10.Общесоюзный нормативный документ ОНД-86. Л.: Гидрометеиздат,  
1987. 93 с.