

УДК 662.959.2:662.76

**А. Д. Легкий, В. М. Фокин**

*Волгоградский государственный технический университет*

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ СЖИЖЕННОГО ГАЗА**

Проведено исследование влияния каталитических покрытий на эффективность доокисления продуктов недожога сжиженного газа. Показаны экспериментальная установка и каталитическая сетка для доокисления монооксидов углерода и азота при двух основных режимах работы горелки. Анализ эффективности работы каталитического покрытия осуществлялся в зависимости от расстояния над уровнем пламени горелки, а также от безразмерного коэффициента, учитывающего отношение высоты к диаметру ячейки.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** каталитическое покрытие, сжиженный газ, каталитическая сетка, монооксиды углерода, монооксиды азота, газозвоздушная смесь.

### **Введение**

В настоящее время сжиженный углеводородный газ широко используется в быту, промышленности и транспорте благодаря высокой плотности энергии и удобству хранения. Он применяется для систем отопления, работы котлоагрегатов, а также в качестве альтернативного топлива для теплотехнологического оборудования [1—4]. Однако при неполном сгорании сжиженного газа возникает проблема образования продуктов недожога — монооксидов углерода и азотистых соединений. Это связано с недостатками кислорода, неправильной настройкой горелочного оборудования или нарушениями условий сгорания топлива.

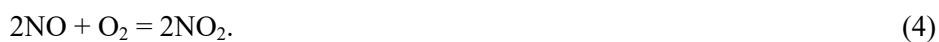
*Цель исследования.* Данная статья посвящена исследованию влияния каталитического покрытия на газозвоздушную смесь с целью доокисления продуктов недожога топлива. Исследование проводилось с целью определения возможности повышения эффективности процесса горения сжиженного газа за счет установки каталитических сеток над горелочным устройством в теплотехнологических установках. В статье рассмотрен процесс доокисления продуктов недожога газозвоздушной смеси через каталитическую сетку, в активную поверхность которой было произведено внедрение легирующих веществ методом ионной имплантации. Благодаря данному методу удается нанести на любую поверхность вещества легирующий слой достаточно тонко — для экономии металла, а также для придания новых свойств поверхности. На основе данного метода была создана каталитическая сетка определенных геометрических параметров для дожигания токсичных продуктов сгорания сжиженного газа. Вещества, которые вступают в промежуточные химические реакции с реагирующими веществами и при этом после каждой промежуточной стадии их состояние и количество остаются неизменными, называют катализаторами. Катализ — это явление, которое состоит в том, что присутствие в системе какого-либо вещества ускоряет протекание химической реакции, причем состояние и количество этого вещества в конце реакции остаются неизменными [5—8].

Согласно исследованиям, наибольшим коэффициентом токсичности обладает оксид углерода, что делает его основным объектом контроля и регулирования выбросов в атмосферу. Кроме того, он также имеет большое значение для климатологических прогнозов, так как является одной из главных составляющих парниковых газов. По этой причине правительства многих стран активно работают над созданием новых технологий и методов, позволяющих снизить уровень выброса  $\text{CO}_x$  в атмосферу [3, 4, 6, 7]. Одна из таких технологий — это установка каталитического дожигателя, который позволяет достичь более глубокого процесса сжигания топлива. Этот инструмент используется для удаления остатка органических материалов после полного сгорания топливных частиц. Благодаря такому оборудованию можно существенно снизить количество выбрасываемых вредных веществ в атмосферу, включая  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ .

Воздействие катализатора, нанесенного методом ионной имплантации, определяется реакцией дегидрирования углеводородов, которое заключается в отщеплении водорода от молекулы углеводорода, что ускоряет процесс сгорания и уменьшает концентрацию несгоревших углеводородов. Водород, образованный при этом в зонах, богатых топливом, восстанавливает оксиды азота и углерода [9—12]. Основные компоненты токсичных выбросов дымовых газов, входя в щели между пластинами нейтрализатора, восстанавливаются на катализаторе по реакциям [5, 10, 13]



и доокисляются кислородом, активированным поверхностью катализатора, по уравнениям



Таким образом, газовая горелка с установленной над ее пламенем каталитической сеткой не только обеспечивает более полное сгорание топлива, но и позволяет резко снизить, в сравнении с обычной газовой горелкой, количество оксидов азота и оксидов углерода в продуктах сгорания, снижая тем самым токсичные выбросы в атмосферу.

В статье проведено исследование по выбору наиболее подходящих параметров расстояния и эквивалентного диаметра каталитической сетки, установленной над пламенем горелки, для достижения максимальной производительности и экономии топлива.

#### **Материал и методы**

Для снижения количественного содержания монооксидов углерода и азотистых соединений предлагается использование каталитического покрытия, нанесенного на металлическую сетку, установленную по ходу движения в образованной газоздушной смеси, полученной в результате сгорания сжиженного газа [5, 6].

Для исследования влияния каталитического покрытия была спроектирована экспериментальная установка, состоящая из походной газовой горелки «Восток» и алюминиевой трубы, состоящей из четырех секций высотой 45, 90, 160 и 210 мм, между которыми устанавливалась легированная сетка.

Схема и внешний вид экспериментальной установки приведены на рис. 1.

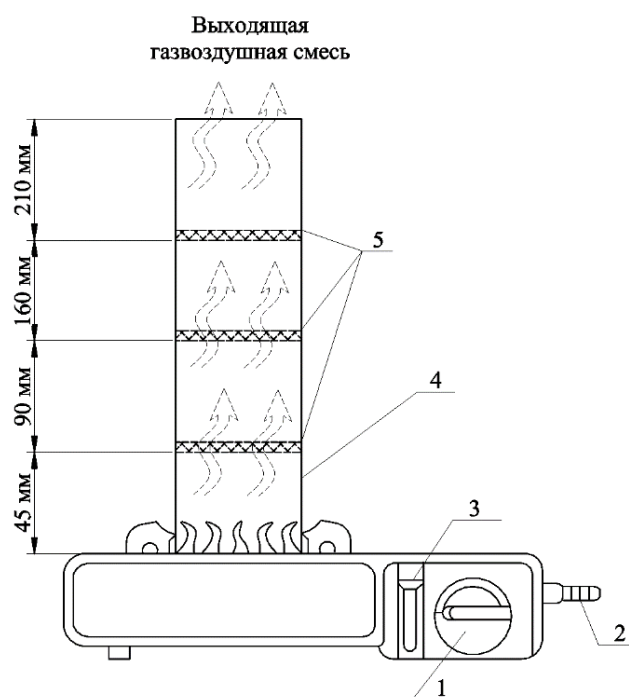


Рис. 1. Схема и внешний вид экспериментальной установки по исследованию влияния эффективности работы каталитических сеток дожигателя на состав продуктов сгорания в горелочном устройстве: 1 — регулятор подачи газа; 2 — штуцер соединительный для внешнего баллона газа; 3 — фиксатор соединительный для внутреннего баллона газа; 4 — телескопическая алюминиевая труба; 5 — место установка каталитической сетки дожигателя

Вытяжной коллектор выполнен в форме цилиндрических секций, с регулировкой по высоте.

Геометрические размеры секций трубы:

- секция 1:  
высота — 109,83 мм;  
внутренний диаметр — 89,84 мм;  
толщина стенки — 0,76 мм;
- секция 2:  
высота — 109,85 мм;  
внутренний диаметр — 88,65 мм;  
толщина стенки — 0,76 мм;
- секция 3:  
высота — 109,82 мм;  
внутренний диаметр — 96,67 мм;  
толщина стенки — 0,76 мм;
- секция 4:  
высота — 109,81 мм;  
внутренний диаметр — 89,59 мм;  
толщина стенки — 0,76 мм;

Каталитическая сетка представляет собой сталь, поверхность которой подвергалась корпускулярному легированию ионами и нейтральными нитридами молибдена.

Для эксперимента была взята сетка площадью  $23,766 \text{ мм}^2$ , с целью определения влияния расстояния каталитической сетки и ее эквивалентного диаметра, рассматривался безразмерный параметр  $W$ , на состав газа, проходящего через цилиндрические секции [13].

Внешний вид каталитической сетки представлен на рис. 2.

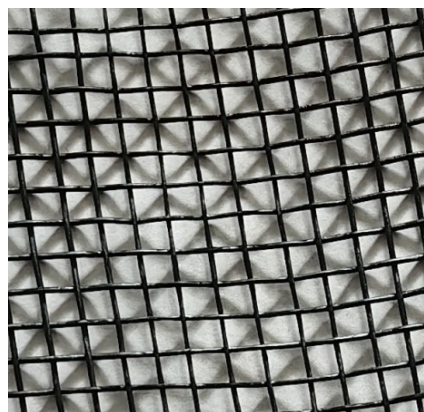


Рис. 2. Внешний вид каталитической сетки

Контроль параметров выходящей газовой смеси определялся портативным газоанализатором ДАГ-510 ГВ, который позволяет производить замеры температуры газового потока, монооксида азота и углерода, диоксида азота и углерода, потери теплоты с уходящим потоком воздуха, а также коэффициент избытка воздуха.

Общий вид установки с подключенным датчиком газоанализатора, а также общий вид газоанализатора ДАГ-510 ГВ приведены на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид установки с подключенным датчиком газоанализатора

Калибровка местоположения датчика газоанализатора ДАГ-510 ГВ относительно пламени горелки на разных уровнях приведена на рис. 4.



Рис. 4. Калибровка местоположения датчика газоанализатора ДАГ-510 ГВ над третьей секцией относительно пламени горелки при минимальном режиме работы

Полученный анализ каталитических сеток дожигателя сведен в табл. 1.

В результате проведенного эксперимента были получены экспериментальные показатели количественного содержания диоксида углерода и монооксида азота в зависимости от установленного расстояния над пламенем горелки, а также от безразмерного коэффициента  $W$ . Для эффективности работы каталитического покрытия также был произведен замер параметров без установленной каталитической сетки. Замер осуществлялся при двух основных параметрах работы горелочного устройства: при минимальном и номинальном режиме работы.

Т а б л и ц а 1

*Анализ каталитических сеток дожигателя*

Высота $H$ , м	Длина ячейки $a$ , м	Ширина ячейки $b$ , м	Смоченный периметр ячейки $P_{см}$ , м	Площадь ячейки $S$ , м <sup>2</sup>	Эквивалентный диаметр $D_э$ , м	Безразмерный коэффициент $W$ , $H/D_э$
0,045	0,0051	0,0048	0,01986	0,024633	0,004961	9,0708
0,095						19,149
0,16						32,252
0,21						42,33

Полученные результаты каталитической сетки приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Результаты исследования каталитической сетки*

Наличие сетки	Расстояние от пламени до сетки $H$ , мм	Безразмерный коэффициент $W$ , $H/D_э$	Монооксид азота NO, ppm	Диоксид углерода CO <sub>2</sub> , %
<i>Минимальный режим работы горелки</i>				
Без сетки	45	—	30	3,9
	95		10	1,84
	160		8	1,67
	210		7	1,59
С сеткой	45	9,0708	39	3,99
	95	19,149	17	3,24
	160	32,252	12	2,33
	210	42,33	9	2,03
<i>Номинальный режим работы горелки</i>				
Без сетки	95	—	38	4,47
	160		22	3,46
	210		13	2,66
С сеткой	95	19,149	60	5,81
	160	32,252	23	3,82
	210	42,33	15	3,01

На основании полученных данных были составлены графики зависимостей параметров газовоздушной смеси от высоты каталитических сеток над пламенем горелки при минимальном и номинальном режиме работы горелки (рис. 3, 4.)

Также были получены графики зависимостей параметров газовоздушной смеси от безразмерного коэффициента  $W$  при минимальном и номинальном режиме работы горелки (рис. 5, 6).

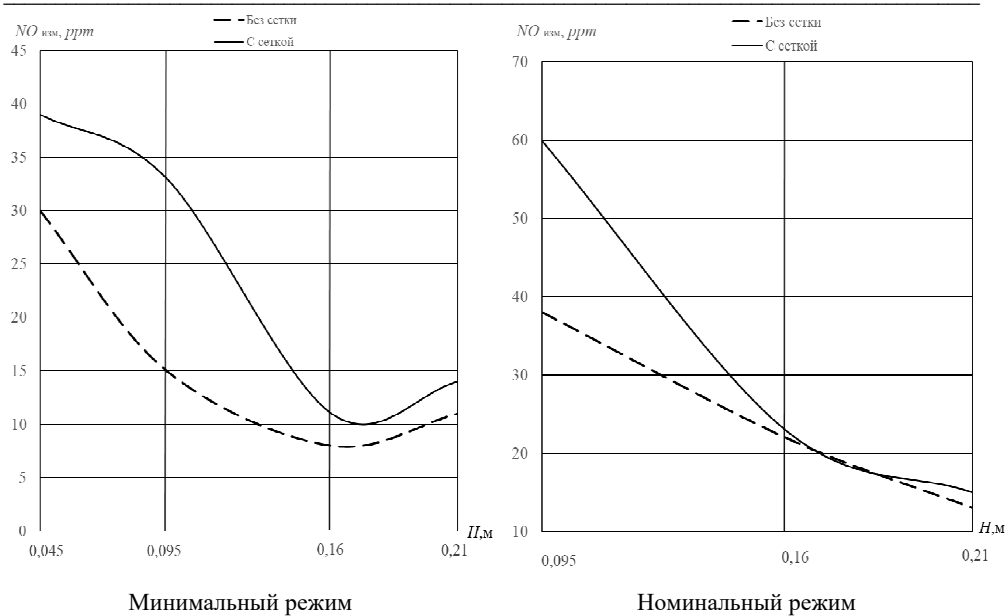


Рис. 3. Зависимость содержания монооксида азота NO, ppm, от высоты пламени горелки  $H$  при минимальном и номинальном режимах

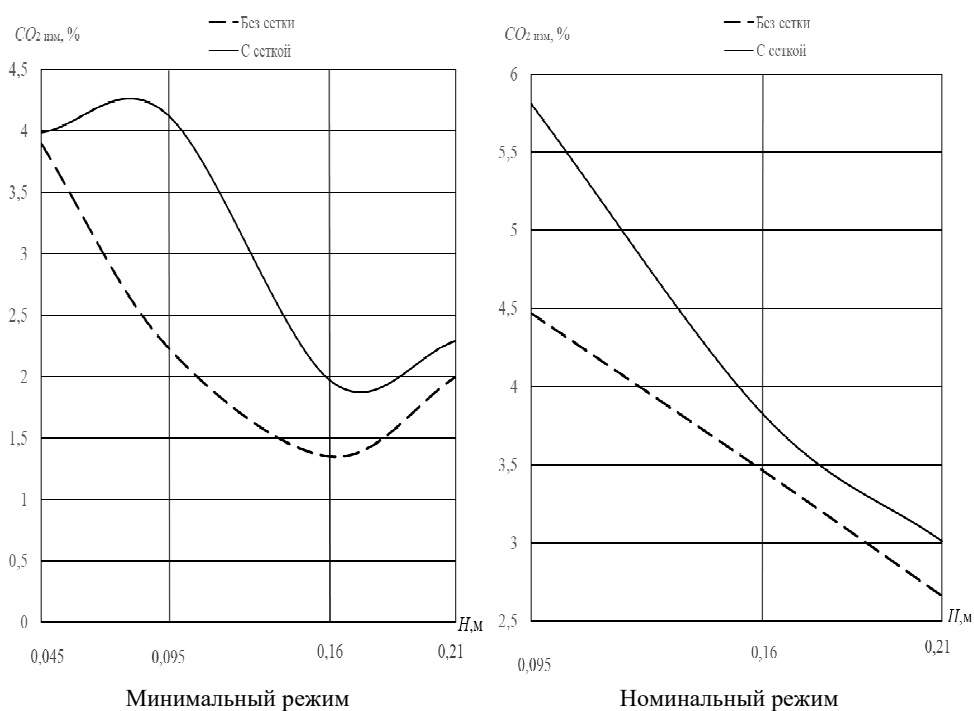


Рис. 4. Зависимость процентного содержания диоксида углерода CO<sub>2</sub>, %, от высоты пламени горелки  $H$  при минимальном и номинальном режимах

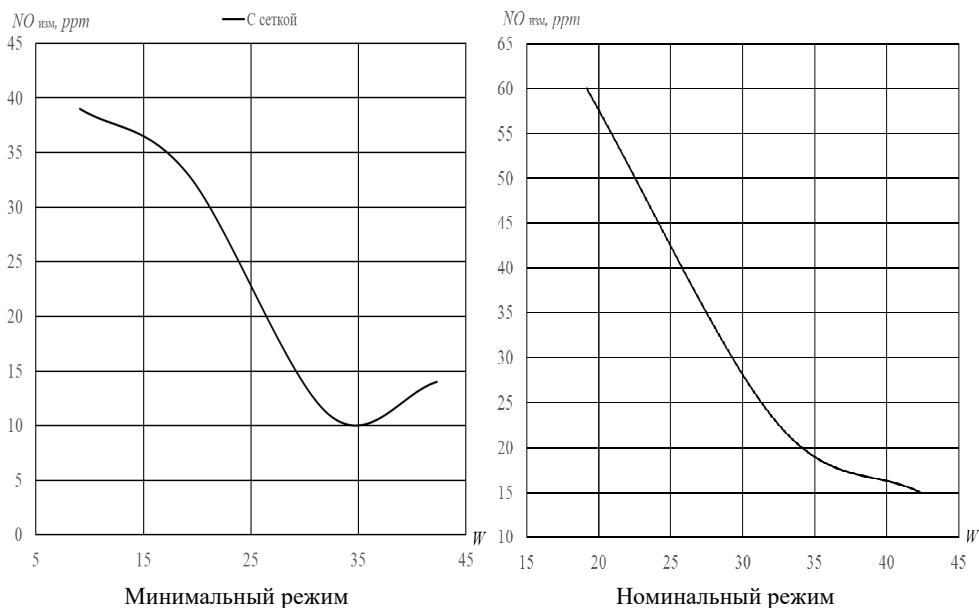


Рис. 5. Зависимость содержания монооксида азота  $NO$ , ppm, от безразмерного коэффициента  $W$  при минимальном и номинальном режимах

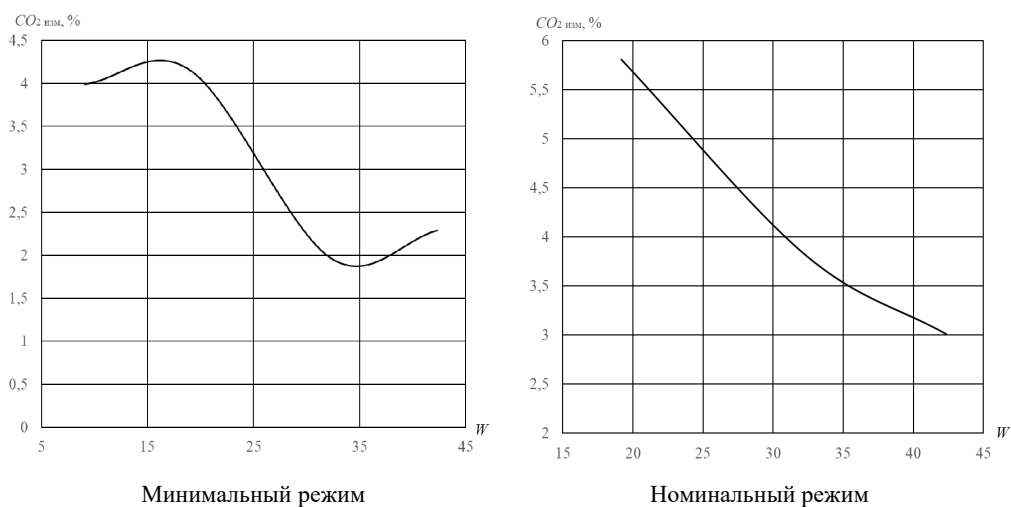


Рис. 6. Зависимость процентного содержания диоксида углерода  $CO_2$ , %, от безразмерного коэффициента  $W$  при минимальном и номинальном режимах

### Выводы и заключение

Для исследования каталитической сетки за основные параметры исследования были приняты: расстояние сетки от пламени горелки и безразмерный коэффициент  $W$ , учитывающий отношение высоты установленной сетки над уровнем пламени горелки к эквивалентному диаметру ячейки.

Полученные показатели от данных параметров позволяют доказать эффективность использования каталитических покрытий для доокисления

продуктов недожога сниженного газа, а также позволяют провести более глубокий анализ влияния каталитического покрытия при прохождении через него продуктов сгорания сжиженного газа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Злобин В. Н., Душко О. В., Лукин В. В. Экологические и экономические аспекты применения ионной имплантации для производства нейтрализаторов // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Естеств. науки. 2004. Вып. 3(10). С. 189—191.
2. Куц Л. Р., Злобин В. Н., Фокин В. М. Использование корпускулярного легирования для совершенствования горелочных устройств при сжигании газообразных топлив // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2008. Вып. 9(28). С. 116—118.
3. Куц Л. Р., Злобин В. Н., Фокин В. М. Каталитические свойства поверхностей газогорелочных устройств теплогенерирующих установок // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы VI Междунар. науч. конф., г. Волгоград, 14—18 мая 2008. Волгоград : ВолГАСУ, 2008. С. 34—40.
4. Куц Л. Р., Злобин В. Н., Фокин В. М. Нейтрализатор токсичных продуктов сгорания для газогорелочных устройств котельных установок // Повышение безопасности энергетических комплексов, эффективности охраны труда и экологичности технологических процессов : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань, 2010. С. 195—199.
5. Создание методов каталитических покрытий для нейтрализаторов уходящих газов / А. Д. Легкий, В. Н. Злобин, А. С. Кудашев и др. // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исследований. 2020. № 12. С. 70—74.
6. Легкий А. Д., Фокин В. М. Каталитическое дожигание сжиженного газа с целью повышения эффективности и надежности теплотехнических устройств : моногр. Волгоград : ВолГТУ, 2025. 126 с.
7. Надарейшвили Г. Г. Методы разработки систем последующей обработки отработавших газов : моногр. М. : ТрансЛит, 2020. 192 с.
8. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л. : Недра, 1988. 311 с.
9. Исследование выхода окислов азота при сжигании топлива в факеле и псевдоожженном слое / И. Я. Сигал и др. // Теплоэнергетика. 1974. № 12. С. 30—33.
10. Тарабарин Л. И. Анализ новизны технологии очистки отходящих газов промышленных и энергетических предприятий, коммунальных и бытовых энергетических установок, а также выхлопных газов транспортных устройств и мобильных энергетических установок от токсичных компонентов в России // Инновации и инвестиции. 2023. № 11. С. 180—184.
11. Ташимбетова А. Т., Буганова С. Н., Секенова А. У., Кушкаров Э. Ш. Теплофизические свойства кластерных газов: исследования влияния кластеров на уравнение состояния и вязкость газов. Новосибирск : Сибирская академическая книга, 2020. 110 с.
12. Sotoodeh K. Chapter Two — LNG technology // Cryogenic Valves for Liquefied Natural Gas Plants. 2022. Pp. 57—109. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99584-9.00007-0>.
13. Легкий А. Д., Злобин В. Н., Кудашев А. С., Карпузова Н. Ю. Каталитический дожигатель : пат. 211537 U1 Рос. Федерация : МПК F23J 15/00, B01D 53/34. № 2021137848 ; заявл. 20.12.2021 ; опубл. 10.06.2022.

© Легкий А. Д., Фокин В. М., 2026

Поступила в редакцию  
12.02.2026

Ссылка для цитирования:

Легкий А. Д., Фокин В. М. Эффективность работы системы теплогазоснабжения при сжигании сжиженного газа // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 234—243. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_234.

Об авторах:

**Легкий Александр Дмитриевич** — старший преподаватель каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; [alegkii@mail.ru](mailto:alegkii@mail.ru)

**Фокин Владимир Михайлович** — д-р техн. наук, проф., Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

**Aleksandr D. Legky, Vladimir V. Fokin**

*Volgograd State Technical University*

## **EFFICIENCY OF THE HEAT AND GAS SUPPLY SYSTEM WHEN COMBUSTING LIQUEFIED GAS**

This article examines the influence of catalytic coatings on the efficiency of post-oxidation of liquefied gas combustion byproducts. An experimental setup and catalytic gauze for post-oxidation of carbon and nitrogen monoxides are presented under two main burner operating conditions. The efficiency of the catalytic coating was analyzed as a function of the distance above the burner flame, as well as a dimensionless coefficient accounting for the cell height-to-diameter ratio.

**Key words:** catalytic coating, liquefied gas, catalytic mesh, carbon monoxides, nitrogen monoxides, gas-air mixture.

### *For citation:*

Legky A. D., Fokin V. V. [Efficiency of the heat and gas supply system when combusting liquefied gas]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 234—243. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_234.

### *About authors:*

**Aleksandr D. Legky** — Senior Lecturer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alegkii@mail.ru

**Vladimir V. Fokin** — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation