

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

***INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL***

---

**ISSN 2303-9868 PRINT  
ISSN 2227-6017 ONLINE**

Екатеринбург  
2016

DOI: 10.18454/IRJ.2016.52.191

Корнилова Н.В.<sup>1</sup>, Трубаев П.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-4240-8488,

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0003-1710-1599, Доктор технических наук,

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

*Аннотация*

*В работе приведены результаты промышленного эксперимента с целью анализа состава газов, образующихся при сжигании отходов. Результаты замеров показали, что по всем определяемым показателям расчетные приземные концентрации вредных веществ не превышают предельно допустимых концентраций. При сжигании отходов в пиролизных котлах вредных веществ образуется в 2–10 раз меньше, чем при слоевом сжигании. Содержание вредных выбросов в отходящих газах, кроме характеризующего полноту сгорания монооксида углерода, от режимных параметров котлов не зависит.*

**Ключевые слова:** отходы, сжигание, выбросы.

Kornilova N.V.<sup>1</sup>, Trubaev P.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-4240-8488,

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0003-1710-1599, PhD in Engineering,

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

## DEFINITION OF POLLUTANTS EMISSIONS IN THE HOT-WATER BOILER AT BURNING OF THE DIFFERENT HARD WASTE

*Abstract*

*Results of industrial experiment for the purpose of the analysis of a compound of the gases formed at burning of a waste are in-process resulted. Results of indications have shown that on all defined parameter's settlement ground concentration of harmful substances do not exceed maximum permissible concentration. At burning of a waste in pyrolysis boiler of harmful substances time is formed at 2-10, than at burning in a layer less. The maintenance of harmful emissions in a waste-heat, except characterizing completeness of combustion CO, does not depend on operating conditions of boiler.*

**Keywords:** waste, burning, emissions.

**В** настоящее время не существует экономически эффективного и одновременно экологически безопасного решения для утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) [1, 2]. Существующая система управления отходами в России ориентирована преимущественно на их захоронение на полигонах. Это приводит к выводу из использования больших земельных площадей, загрязнению атмосферы биогазом, а почвы и водоемов – вредными веществами, вымываемыми с полигонов атмосферными осадками [2].

Сжигание бытового мусора является наиболее привычным и широко распространенным способом его утилизации. По данным работы [2] в Европейских странах (без России) структура утилизации ТБО следующая:

- захоронение на полигонах 61%;
- сжигание 16%, в том числе с получением энергии 11%;
- вторичная переработка 13%;
- компостирование 8%;
- иное 2%.

В этой же работе приведены данные, что в США объем сжигаемых ТБО после 2000-х годов стал сопоставим с объемом отходов, размещаемых на полигонах.

Термическое обезвреживание отходов при температурах свыше 850-1000°C в современных установках обеспечивает практически полное разрушение органических вредных веществ. Технология сжигания ТБО на колосниковой решетке не требует предварительной подготовки мусора, отличается высокой надежностью, является экономичной [3]. Но эта технология на промышленном уровне реализована только в котлах большой производительности. Вместе с тем для нашей страны является актуальным утилизация небольшого количества отходов [3, 4], образующихся в небольших населенных пунктах, промышленных технологий для которой не существует. Одной из главных проблем при этом является наличие вредных выбросов.

В работе произведена оценка отдельных выбросов при сжигании отходов различного вида в двух водогрейных котлах небольшой производительности. Для этого проведен промышленный эксперимент, в котором проводились измерения содержания вредных веществ в дымоходе после котла, затем определялась расчетная приземная концентрация веществ, которая сравнивалась с нормами предельно допустимой концентрации (ПДК) выбросов в атмосферном воздухе населенных мест.

Испытания [5] проводились на базе двух котлов, эксплуатируемых ТК «Экотранс» (г. Белгород):

– пиролизный отопительный котел мощностью 100 кВт марки «КО-100» производства ООО «Боркотломаш» (Воронежская обл.);

– твердотопливный отопительный котел с колосниковой решеткой и дутьевым вентилятором мощностью 200 кВт производства ТК «Экотранс».

В ходе испытаний проводилось сжигание материалов, представленных в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика сжигаемых отходов

№	Состав	Форма
Пиролизный котел		
1	Железнодорожные шпалы	Крупные неизмельченные фрагменты
2	Древесина (сосна)	
3	Древесина (окна, двери, мебель)	
4	Древесные гранулы	Брикеты
5	Смесь древесных гранул и RDF-топлива	
6	RDF-топливо	
Котел со слоевым сжиганием		
7	Древесина 70%, пластик 30%	Брикеты
8	Древесина 50%, пластик 50%	

Топливо № 1–3 сжигалось в виде крупных фрагментов. Подготовка топлив № 4–8 велась в виде прессованных брикетов из предварительно измельченных отходов [6, 7] диаметром 50 мм и длиной до 400 мм (рис. 1).



Рис. 1 – Топливные брикеты

Для определения выбросов использовался измерительный комплекс – газоанализатор ГАНК-4. Характеристика вредных веществ, концентрация которых измерялась, приведена в табл. 2. Для каждого вещества в таблице приведены предельно допустимые концентрации, приведенные согласно ГН 2.1.6.1338-03 (с изменениями 2005–2009 г.). Содержание  $\text{NH}_3$  и  $\text{H}_2\text{S}$  не определялось для топлив № 1–6, а бензола – для топлив 7 и 8.

Таблица 2 – Характеристика вредных веществ

Наименование вещества	Химическая формула	Предельно-допустимая концентрация в атмосферном воздухе населенных мест, мг/м <sup>3</sup>		Класс опасности
		максимально-разовая ПДК <sub>мр</sub>	среднесуточная ПДК <sub>сс</sub>	
Азота оксид	NO	0,4	0,06	3
Углерода оксид	CO	5	3	4
Фенол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	0,01	0,003	2
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,3	0,1	2
Аммиак	NH <sub>3</sub>	0,2	0,04	4
Сероводород	H <sub>2</sub> S	0,008	–	2

Расчет значения приземной концентрации вредных веществ производился по методике ОДН-86 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий». Соотношение расчетной приземной концентрации и ПДК приведены в табл. 3. Как видно из данных, концентрация всех веществ значительно ниже ПДК для всех видов топлив.

Таблица 3 – Отношение расчетной приземной концентрации выбросов вредных веществ к максимально разовой и среднесуточной ПДК

№	NO <sub>x</sub> (в пересчете на NO)	CO	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S
1	0,06/0,35%	0,02/0,04%	0/0%	0,29/0,88%	–	–/–
2	0/0,02%	0,04/0,06%	0,07/0,23%	0,01/0,02%	–	–
3	0,15/0,93%	0,05/0,08%	1,07/3,57%	0,49/1,48%	–	–
4	0,06/0,37%	0,05/0,08%	0,07/0,23%	0,01/0,02%	–	–
5	0,16/0,97%	0,05/0,08%	0/0%	0,19/0,58%	–	–
6	0,01/0,11%	0,02/0,03%	0,01/0,02%	0,09/0,26%	–	–
7	0,42/2,12%	1,86/3,1%	1,25/4,16%	–	7,71/38,53%	1,49%/–
8	1,26/6,31%	1,37/2,29%	0,06/0,2%	–	2,63/13,14%	2,12%/–

Для интегральной оценки выбросов использовался показатель  $V$ :

$$V = 28 \text{ NO}_x / \text{ПДК}_{\text{сс NO}_x} + 36 \text{ CO} / \text{ПДК}_{\text{сс CO}} + 18 \text{ C}_6\text{H}_6\text{O} / \text{ПДК}_{\text{сс C}_6\text{H}_6\text{O}} + 18 \text{ C}_6\text{H}_6 / \text{ПДК}_{\text{сс C}_6\text{H}_6}, \%$$

где  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$  –приземная концентрация,  $\text{мг/м}^3$ ; 28, 36, 18, 18 – весовые коэффициенты, пропорциональные классу опасности вещества.

Сравнение выбросов для различных топлив приведено на рис. 2. Полученные результаты не полностью характеризуют указанные топлива, так как кроме состава на содержание выбросов так же влияет режим сжигания (температура и избыток воздуха), но позволяют качественно сопоставить экологические характеристики котлов и топлив.

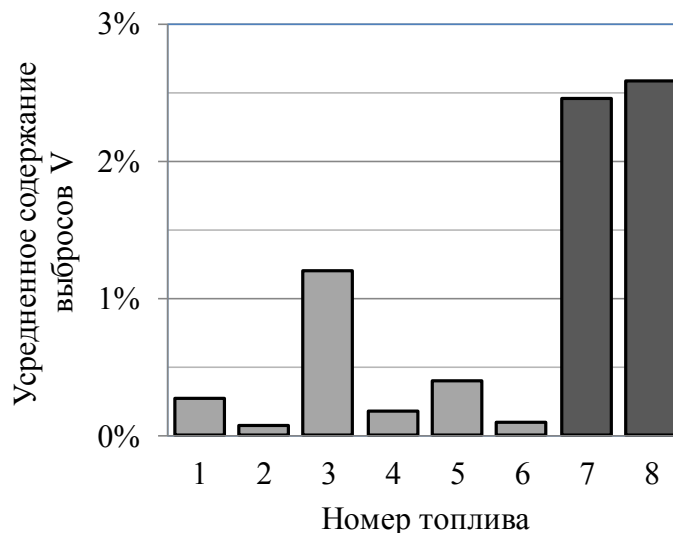


Рис. 2 – Сравнение выбросов при сжигании различных топлив

Одновременно с анализом отходящих газов на содержание вредных веществ проводились теплотехнические испытания котла с определением:

- температуры отходящих газов  $t_{\text{ог}}$  и содержания в них кислорода в дымоходе за котлом для расчета коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  (показатели определялись с использованием газоанализатора дымовых газов Testo 330L, работающего в режиме автоматической регистрации параметров);
- температура горения  $t_{\text{г}}$  (периодически определялась по температуре топлива в топке с использованием инфракрасного пирометра Testo 845).

По результатам измерений между температурой отходящих газов и коэффициентом избытка воздуха в топке котла имеется линейная зависимость (рис. 3). Поэтому в дальнейшем содержание вредных выбросов

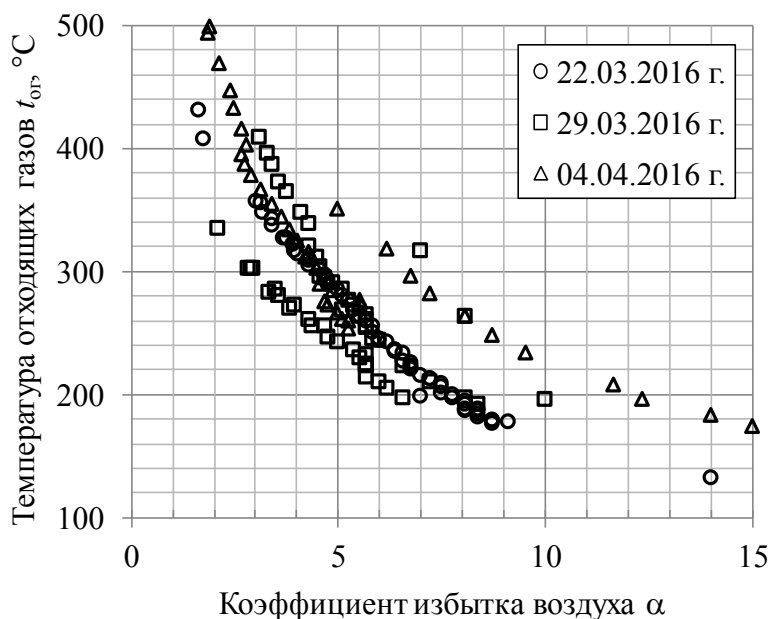


Рис. 3 – Данные регистрации параметров отходящих газов

Для анализа количества выбросов от режима сжигания топлива использовались данные серии измерений, приведенные в табл. 4, где значение содержания вредных выбросов являются результатом разовых измерений, а температуры и коэффициент избытка воздуха усреднены за промежуток время выполнения газового анализа.

Таблица 4 – Режимные параметры котла и содержание вредных выбросов

№ топлива	Температура, °С		$\alpha$	Содержание в охлажденных отходящих газах, мг/м <sup>3</sup>					
	$t_{ог}$	$t_r$		СО	NO <sub>2</sub>	Аммиак	Меркаптаны	H <sub>2</sub> S	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O
7	222	–	5,67	1085	14,1	105	19,4	0,71	0,462
7	273	670	5,00	725	15,0	142	13,9	1,44	1,98
7	284	–	3,50	440	11,04	0	15,7	0,66	0,711
7	302	650	6,65	920	7,04	163	9,1	1,17	1,21
7	340	760	3,72	445	12,5	190	12,5	2,22	2,44
Среднее	313	–	4,97	582	18,6	98	5,8	1,51	0,798
8	257	–	5,67	1235	57,2	60	3,48	1,53	0,052
8	298	–	4,69	475	37,3	53	0	2,36	0
8	380	–	3,53	207	15,2	37,1	0	1,08	0
Среднее	254	–	4,95	920	27,4	55	3,5	0,97	0,408

Зависимость содержания вредных выбросов от режимных параметров котла обнаружена только между содержанием СО и температурой отходящих газов (коэффициент корреляции –0,80) или коэффициентом избытка воздуха (–0,84). Между содержанием остальных выбросов и  $t_{ог}$  или  $\alpha$  зависимости нет (модуль коэффициента корреляции не превышает 0,39). Так же нет зависимости между содержанием различных выбросов. Таким образом кроме полноты сгорания, которую характеризует содержание СО, содержание выбросов в области рабочих диапазонов функционирования водогрейных котлов от режима их работы не зависит.

Выводы. Результаты замеров состава газов после котлов, сжигающих отходы различного вида, показали, что по всем определяемым показателям расчетные приземные концентрации вредных веществ не превышают ПДК. Таким образом сжигание древесных отходов и ТБО в котлах малой производительности не оказывает неблагоприятного воздействия на окружающую среду и человека. При сжигании отходов в пиролизных котлах вредных веществ образуется в 2–10 раз меньше, чем при слоевом сжигании. Содержание выбросов в отходящих газах, кроме характеризующего полноту сгорания монооксида углерода, от режимных параметров котлов не зависит.

#### Список литературы / References

1. Левин Б.И. Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
2. Европейская практика обращения с отходами: проблемы, решения, перспективы. – С.Пб.: НП РЭП, 2004. – 73 с.
3. Тугов А.Н., Москвичев В.Ф. Энергия из мусорного бака // Энергоэффективность и энергосбережение. 2012. № 4. С. 9-13.
4. Порожнюк Л. А., Василенко Т. А., Порожнюк Е. В. Роль экологического аудита в обращении с отходами в Белгородской области // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 177-180.
5. Кожевников В. П., Токач Ю. Е., Огнев М. Н. Современные решения по переработке твердых бытовых отходов в БГТУ им. В.Г. Шухова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 1. – С. 172-174.
6. Исследование процессов теплообмена в материалах и аппаратах цементной технологии / Трубаев П.А., Гришко Б.М., Украинский В.А., Сухорослова В.В. – Белгород: Изд-во БГТУ, БИЭИ, 2013. – 190 с.
7. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 102-106.
8. Севостьянов М.В. Ресурсосберегающее оборудование для комплексной переработки техногенных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. № 4. С. 140-145.

#### Список литературы латинскими символами / References in Roman script

1. Levin B. I. Ispolzovanie tverdykh bytovykh othodov v sistemakh energosnabzheniia [Use of a hard human refuse in power supply systems]. М.: Energoizdat. 1982. 224 p. [in Russian].
2. Evropejskaja praktika obrashhenija s othodami: problemy, reshenija, perspektivy [The European practice of the reference with a waste: problems, solutions, prospects]. – S.Pb.: NP REP, 2004. – 73 c. [in Russian]
3. Tugov A.N., Moskvichev V.F. Energiia iz musornogo baka [Energy from a garbage forecastle] // Energoeffektivnost' i energosberezenie. 2012. № 4. С. 9-13. [in Russian].
4. Porozhnjuk L. A., Vasilenko T. A., Porozhnjuk E. V. Rol' jekologicheskogo audita v obrashhenii s othodami v Belgorodskoj oblasti [Ecological audit role in circulation with a waste in the Belgorod region] // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. # 4. P. 177-180. [in Russian].
5. Kozhevnikov V. P., Tokach Ju. E., Ognev M. N. Sovremennye reshenija po pererabotke tverdykh bytovykh othodov v BGTU im. V.G. Shukhova [Modern solutions on rehash of a household waste in BGTU after V.G. Shukhov] // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. # 1. P. 172-174. [in Russian].
6. Trubaev P.A., Grishko B.M., Ukrainskij V.A., Suhoroslova V.V. Issledovanie processov teploobmena v materialah i apparatah cementnoj tehnologii [Research of processes of heat exchange in materials and apparatuses of cement production engineering] – Belgorod: Izd-vo BGTU, BIEI, 2013. – P.173. [in Russian].

7. Glagolev S.N., Sevost'janov V.S., Gridchin A.M., Ural'skij V. I., Sevost'janov M. V., Jadykina V. V. Resurso-jenergoberegajushhie moduli dlja kompleksnoj utilizacii tehnogennyh materialov [Resurso-power saving up modules for complex salvaging of technogenic materials] // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. # 6. P. 102-106. [in Russian].

8. Sevost'janov M.V. Resursosberegajushhee oborudovanie dlja kompleksnoj pererabotki tehnogennyh materialov [The resursosberegajushchee equipment for complex rehash of technogenic materials] // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. # 4. P. 140-1456. [in Russian].

DOI: 10.18454/IRJ.2016.52.127

Кукис В.С.<sup>1</sup>, Шабалин Д.В.<sup>2</sup>, Омельченко Е.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 000-0002-8234-2009, Доктор технических наук, профессор,

Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации», <sup>3</sup>кандидат технических наук, Омский автобронетанковый инженерный институт

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

#### Аннотация

*В статье рассмотрена методика решения аналитической задачи оптимизации вихревой трубы. Авторским коллективом предложен способ графического представления функции от нескольких переменных, позволяющий с помощью простых геометрических операций исследовать функциональные зависимости. Преимущество предлагаемого номографического способа перед расчетным состоит в простоте использования. Он позволяет с достаточной для большинства инженерных расчетов точностью, по расположению оптимальной области в факторном пространстве, производить предварительные исследования рациональных геометрических параметров вихревой трубы.*

**Ключевые слова:** вихревая труба, температура, давление, геометрические параметры.

Kukis V.S.<sup>1</sup>, Shabalin D.B.<sup>2</sup>, Omelchenko E.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 000-0002-8234-2009, PhD in Engineering, Federal state budgetary educational institution of higher professional education "South Ural state University" (national research University), <sup>2</sup>PhD in Engineering, Military educational scientific center of Land forces «Combined arms Academy of the Armed Forces of the Russian Federation»,

<sup>3</sup>PhD in Engineering, Omsk tank-automotive engineering Institute

### PARAMETER OPTIMIZATION OF VORTEX TUBE

#### Abstract

*The article describes the method of analytic solutions of the optimization problem of the vortex tube. A group of authors proposed a method of graphic representation of functions of several variables, allowing to explore the functional dependencies using simple geometrical operations. The advantage of the proposed method over nomogrammic calculation is ease of use. He makes enough for most engineering calculations accuracy on the location of the optimal domain in the factor space, to make preliminary studies of rational geometric parameters of the vortex tube.*

**Keywords:** vortex tube, temperature, pressure, geometric parameters.

Газотурбинный наддув, как средство повышения мощности и экономичности силовых установок автомобильного транспорта при всех имеющихся преимуществах имеет и ряд недостатков. Прежде всего, это широкий диапазон изменения температуры свежего заряда воздуха, связанный как с режимом работы двигателя, так и с параметрами окружающей среды. Современные исследователи сходятся во мнении о необходимости стабилизации температуры свежего заряда воздуха на определенном уровне [1]. Широко применяемое в настоящее время охлаждение наддувочного воздуха, которое было предложено еще Рудольфом Дизелем, не является достаточно эффективным решением проблемы обеспечения стабильности показателей температурных параметров систем воздухооборудования современных силовых установок мобильных машин.

Для решения задачи регулирования температуры наддувочного воздуха авторами предлагается использовать вихревой эффект (эффект Ранка-Хилша) – эффект разделения газа или жидкости в закрученном потоке. Устройства на основе вихревого эффекта – вихревые трубы – позволяют получать как охлажденный, так и нагретый воздух на основе одного и того же физического эффекта [2].

На рис. 1 показана возможная схема системы, позволяющей обеспечивать дифференцированное регулирование, вплоть до полной стабилизации температуры, наддувочного воздуха с использованием вихревой трубы [3].