

УДК 53.06:09,67.08

sergej.anahov@rsvpu.ru

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПЛАЗМЕННОГО ДОЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОПАСНЫХ ОТХОДОВ**SUBSTANTIATION OF THE PLASMA AFTERBURNING METHOD FOR GASEOUS PRODUCTS OF HAZARDOUS WASTE PROCESSING**

*Анахов С. В., кандидат физико-математических наук, доцент,
Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург,*

*Матушкин А. В., кандидат технических наук,
Уральский федеральный университет*

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург,

Пыкин Ю. А., доктор технических наук, профессор,

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург

Anakhov S. V., Russian State Vocational-Professional University, Yekaterinburg,

Matushkin A. V., Ural Federal University, Yekaterinburg,

Pyckin Yu. A., Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg

Исследована технология плазменного обезвреживания продуктов переработки опасных отходов. Отмечена проблема образования супертоксикантов (полихлорированных дибензодиоксидов, дибензофуранов, бифенилов и т. д.) в процессе термической переработки бытовых и промышленных отходов различного состава. Для решения данной проблемы предлагается применение в технологиях экологической направленности плазменных генераторов, в которых за счет высокоэнергетического плазменного воздействия на вещества различного фазового состава происходит их глубокое разложение – плазменная инсинерация («сжигание»). В качестве рационального метода плазменного обезвреживания рассматривается внедрение плазмотронов на стадии дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов. Рассмотрены известные методы термического обезвреживания диоксинов. Найдены температурные аппроксимации времени разложения диоксинов в диапазоне температур плазменного нагрева. Введены критерии эффективности плазменного нагрева и обезвреживания.

В дополнение к исследованной ранее технологии плазменного обезвреживания предложена модернизированная конструкция плазмотрона для утилизации газообразных отходов переработки супертоксикантов. Методами математического моделирования определены газодинамические параметры воздушно-плазменного потока в камере смешения плазмотрона для экологических технологий. Определены характерные температуры, скорости и времена нагрева утилизируемого газа в различных областях камеры смешения. Обозначены направления дальнейших исследований и разработок, необходимых для создания технологии плазменной инсинерации с максимальной эффективностью обеззараживания.

Ключевые слова: экологическая безопасность, утилизация отходов, обезвреживание, обеззараживание, инсинерация, плазмотрон.

The technology of plasma neutralization of hazardous waste processing products is investigated. The problem of supertoxicants (polychlorinated dibenzodioxides, dibenzofurans, biphenyls, etc.) formation in the process of thermal processing for household and industrial waste of different composition is noted. To solve this problem, we propose the use of plasma generators in environmental technologies, in which due to the high – energy plasma effect on substances of different phase composition, their deep decomposition (plasma incineration – "burning") occurs. The introduction of plasma torches at the after-burning stage of gaseous products of hazardous waste processing is considered as a rational method of plasma neutralization. Known methods of thermal neutralization of dioxins are considered. Temperature approximations of the dioxins decomposition time in the temperature range of plasma heating are found. Efficiency criteria of plasma heating and neutralization are introduced.

In addition to the previously studied technology of plasma neutralization, a modernized design of a plasma torch for utilization of gaseous supertoxicants waste processing is proposed. The gas-dynamic parameters of the air-plasma flow in the mixing chamber of the plasma torch for environmental technologies are determined by mathematical modeling methods. The characteristic temperatures, velocities and heating times of the utilized gas in different areas of the mixing chamber are determined. The directions of further research and development necessary for the creation of plasma incineration technology with maximum efficiency of disinfection are outlined.

Keywords: ecological safety, waste recycling, waste treatment, decontamination, incineration, plasmatron, plasma torch.

Одной из задач, стоящих в настоящее время перед разработчиками технологий экологической направленности (эко-технологий), является минимизация количества вредных веществ, образующихся в результате их применения. К таким задачам относится и проблема образования супертоксиантов (полихлорированных дибензодioxidов, дибензофуранов, бифенилов и т. д.) в процессе термической переработки бытовых и промышленных отходов различного состава. Одним из решений данной проблемы является применение в технологиях экологической направленности плазменных генераторов – плазмотронов [1], в которых за счет высокоэнергетического плазменного воздействия на вещества различного фазового состава происходит их глубокое разложение – плазменная инсинерация («сжигание») [2]. В настоящее время существует несколько технологий плазменной переработки отходов [3, 4, 5], направленных на решение проблем техно-сферной безопасности, однако широкое их внедрение должно быть обосновано с

точки зрения экологической и экономической эффективности, а также учитывать вопросы безопасности самой технологии (включая пожарную) [6].

С этой точки зрения, одним из рациональных методов плазменного обезвреживания является внедрение плазмотронов на стадии дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов. Подобные технологии с применением дуговых плазмотронов постоянного тока были предложены авторами ранее [3, 4, 6]. В данных работах были обоснованы технологические схемы переработки отходов различного фазового и химического состава с применением плазмотронов, а также показана возможность применения способа плазменной инсинерации на стадии дожигания газообразных продуктов переработки высокого класса опасности. Из широкого ряда таких веществ для оценки эффективности обезвреживания были выбраны диоксины, которые можно отнести к одним из самых опасных суперэко-токси-

кантов техногенного происхождения, обладающих мощным мутагенным, тератогенным и канцерогенным действиями.

Диоксины, как известно, образуются в качестве побочных продуктов в целлюлозно-бумажном, химическом, металлургическом, мусороперерабатывающем и других производствах (особенно хлорных и бромных) [7]. На данный момент наиболее распространенным методом уничтожения диоксинов является высокотемпературное окисление, когда разрушение токсичных соединений осуществляется прямым сжиганием отходов вместе с топливом в печах стационарного или передвижного типа. Снизить содержание диоксинов в отходящих газах можно с помощью активированного угля [8], впрыскиваемого в рукавной фильтр, или установки специальных слоевых фильтров, применяемых, например, в установках по мусоросжиганию Hitachi Zosen Inova, которые в настоящее время внедряются в России [9]. При этом, однако, возникает проблема захоронения зараженного активированного угля, из-за чего широко принятым является мнение, что обязательным элементом печей для сжигания промышленных и бытовых отходов является камера дожигания, необходимая для полного разрушения диоксинов.

По результатам проведенных в последнее время исследований [10] можно сделать вывод, что с целью предотвращения образования диоксинов в зоне горения должны соблюдаться следующие параметры процесса: температура выше 1150–1300 К; время пребывания отходов в зоне горения не менее двух секунд; 6%-й избыток кислорода в газовой смеси; в зоне охлаждения температура в диапазоне 500–800 К и время пребывания не более 1 секунды. Опираясь на небольшое количество известных сведений по высокотемпературному обезвреживанию диоксинов [11] (при

температурах 1500 °С и 5000 °С), авторами были сделаны аппроксимации температурной зависимости необходимого времени их разложения. Поиск аппроксимационных зависимостей был проведен на основе уравнения Аррениуса по критерию R^2 (коэффициенту детерминации R-квадрат) для константы скорости реакции:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1)$$

где k_0 и E зависят от природы реагентов, E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – температура реакции.

Так как время разложения τ и скорость реакции k обратно пропорциональны, поиск проводился по уравнениям двух типов (с постоянным и температурно-зависимым предэкспоненциальным множителем τ_0):

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{E}{RT}}, \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0(T) \cdot e^{\frac{E}{RT}}. \quad (3)$$

Поиск аппроксимации для температурно-зависимого предэкспоненциального множителя $\tau_0(T)$ проводился в логарифмических координатах с применением гипотезы степенной температурной зависимости ($\tau_0(T) = \tau_0 \cdot T^{-n}$). Были получены два уравнения:

$$\tau = 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot e^{\frac{18}{T}}, \quad (4)$$

$$\tau = \frac{7,2 \cdot 10^{-5}}{T^{3/2}} \cdot e^{\frac{21,7}{T}}, \quad (5)$$

где $[\tau] = \text{с}$, $[T] = \text{тыс. К}$, с энергией активации $E = 150 \div 180 \text{ кДж}$.

На основе полученных уравнений были сделаны следующие оценки необходимого времени их разложения (табл. 1).

Таблица 1
Температурная зависимость времени разложения диоксинов

T, тыс. К		1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
τ, мс	по (4)	2000	100	20	5	2	1,2	0,7	0,5	0,3
	по (5)	2000	1300	110	20	5	2	0,9	0,5	0,3

Учитывая то, что в процессе плазменного нагрева объем газовой смеси, проходящий через камеру смешения плазмотрона, прогревается неравномерно (при различных температурах и за разное время), имеет смысл ввести универсальные критерии эффективности разложения диоксинов. Принимая во внимание, что к росту эффективности ведут увеличение как температуры, так и времени нагрева, а также с учетом активационного механизма реакций разложения, на основе полученных аппроксимирующих зависимостей были получены следующие критерии:

$$RT \cdot \ln(\tau/\tau_{10}) > E, \quad (6)$$

$$RT \cdot \ln(T^{3/2} \cdot \tau/\tau_{20}) > E. \quad (7)$$

В качестве числовых критериев оценки эффективности можно использовать следующие выражения:

$$C1 = T \cdot \ln(\tau/\tau_{10}), C1 > 18, \quad (8)$$

$$C2 = T \cdot \ln(T^{3/2} \cdot \tau/\tau_{20}), C2 > 21,7, \quad (9)$$

где $[\tau] = \text{с}$, $[T] = \text{тыс. К}$, $\tau_{10} = 12,8 \text{ мкс}$, $\tau_{20} = 72 \text{ мкс}$.

Так как достоверные сведения о времени разложения диоксинов во всем исследуемом диапазоне температур отсутствуют, целесообразно при оценке эффективности нагрева использовать не данные таблицы 1, а оба предложенных критерия C1 и C2.

Очевидно, что предлагаемая авторами технология плазменного дожигания газообразных отходов должна как минимум обеспечивать требуемое время нахождения газового потока опасных отходов при соответствующей температуре, задаваемой при нагреве камеры смешения (КС) утилизируемых и плазмообразующих газовых потоков плазменной дугой (струей). Подобная технология (рис. 1а), как известно [12], была разработана на базе запатентованной полезной модели дугового плазмотрона [13] с последующей её модернизацией за счет применения модифицированной конструкции для обезвреживания токсичных парогазовых потоков различного состава и фазового состояния. Сама плазменная струя формируется в КС путем взаимодействия плазменной дуги, возбуждаемой и горящей между катодом и анодом соплового узла плазмотрона, с вихревым потоком ПОГ и последующим её выдуванием в КС за счет высокой кинетической энергии потока ПОГ (рис. 1б). Новая конструкция такого плазмотрона отличается наличием камеры смешения (КС), в которой обеспечивается смешение и нагрев потоков тангенциально подаваемой токсичной парогазовой смеси и предварительно закрученного с помощью системы газовихревой стабилизации потока плазмообразующего газа (ПОГ). Патрубки для подачи вторичного (утилизируемого) потока располагаются на сменной части плазмотрона либо могут быть вынесенным за его пределы и располагаться под срезом сопла под любым углом к оси плазменной струи (рис. 1а).

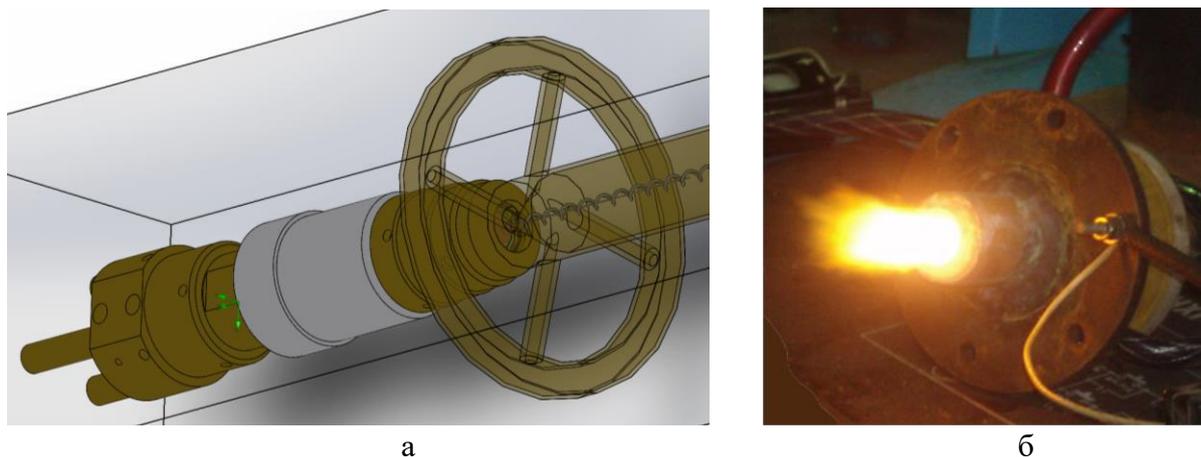


Рисунок 1. Плазматрон для обезвреживания опасных отходов:
а – расчетная модель, б – опытная модель

Оценка эффективности нагрева газозвушной смеси в КС производилась путем расчета газодинамических параметров в приложении FlowWorks программной среды SolidWorks с переменным значением параметра дискретизации расчетной сетки. Газодинамическое моделирование проводилось для воздушно-плазменной среды при характерном для эффективной

газовихревой стабилизации дугового плазматрона массовом расходе основного потока ПОГ 0,011 кг/с и диаметре входного отверстия в КС 4 мм. Расчет температур в КС проводился по нескольким прямолинейным траекториям (линиям) различной удаленности от оси камеры (рис. 2) при характерной для воздушно-плазменной дуги (струи) температуре в 7000 К.

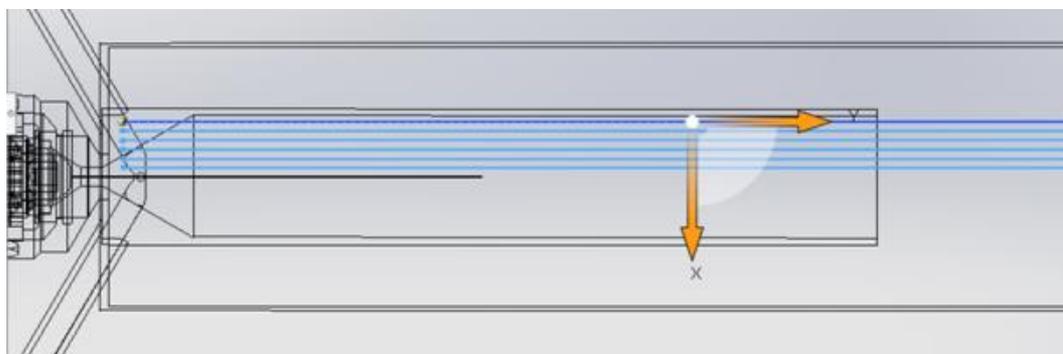


Рисунок 2. Траектории расчета скоростей и температур в камере смешения плазматрона

В первоначально сделанных расчетах была проанализирована технологическая схема с подачей вторичного потока утилизируемого газа по двум осесимметрично расположенным патрубкам под углами 10, 20 и 30 градусов к оси плазменной струи длиной в 90 мм, с массовым расходом 0,005 кг/с на каждую трубку. Геометрия КС: длина не менее 150 мм, угол раскрытия начальной части – 20 °С, раскрытие на остальной длине – для цилиндрической КС

– 0 °С, для конфузорной КС – 5 °С. Результаты расчетов газодинамических параметров (температуры, скорости и времени нагрева) утилизируемого газа в различных областях КС цилиндрического и конфузорного типа показали, что нагрев происходит при средних температурах в КС от 1500 до 4000 К и средних скоростях в 50–100 м/с при характерных временах нагрева от 2 до 5 мс. При конфузорном типе КС время

нагрева увеличивается в 1,5–2 раза в зависимости от траектории, причем наибольшее увеличение происходит вблизи стенок КС. Последние результаты коррелируют с порядками значений времени разложения диоксинов при таких температурах (табл. 1), что свидетельствует о возможности применения способа плазменного дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов в целях повышения экологической эффективности экотехнологии.

На следующем этапе разработки технологии плазменного дожигания была рассмотрена конструктивная схема с подачей утилизируемого газа по касательной к потоку ПОГ по четырем патрубкам диаметром 4 мм, расположенным перпендикулярно оси КС на расстоянии от среза сопла 11 мм (рис. 3 и 4). Подобная схема была выбрана с целью оценки эффективности

работы технологии при более высокой производительности (увеличении объема утилизируемого газа). Для сравнительного анализа были выбраны сопоставимые параметры процесса: расход основного ПОГ – 0,005 кг/с, расход утилизируемого газа на 1 патрубок – 0,004 кг/с, температура дуги при горении в условиях воздушно-плазменной среды – 7000 К. В целях обеспечения эффективного обезвреживания были рассмотрены два варианта нагрева – «короткой» плазменной струей длиной 90 мм (аналогично рассмотренной ранее технологии) и «длинной» плазменной струей в 170 мм. Очевидно, что последний вариант нагрева требует примерно двукратного увеличения мощности источника питания плазменной дуги. Геометрия КС: длина не менее 170 мм, угол раскрытия начальной части – 20°С, раскрытие на остальной длине КС – 0°С (цилиндрическая конфигурация).

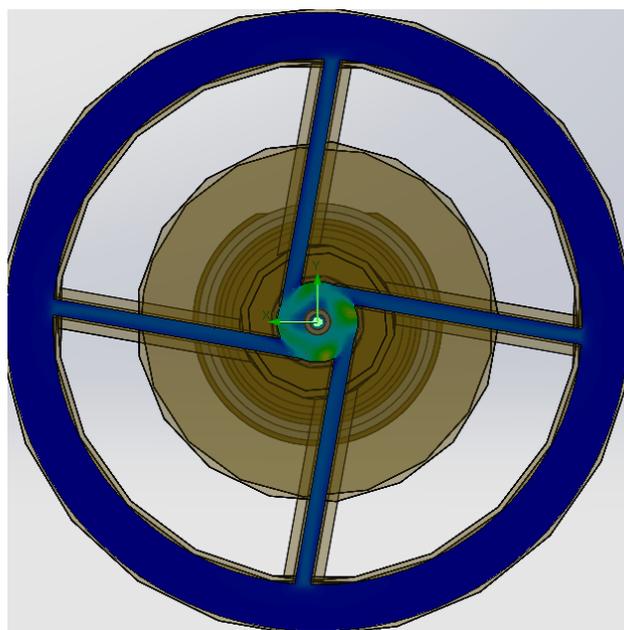


Рисунок 3. Четырехканальная схема подачи утилизируемого газа в камеру смешения плазматрона

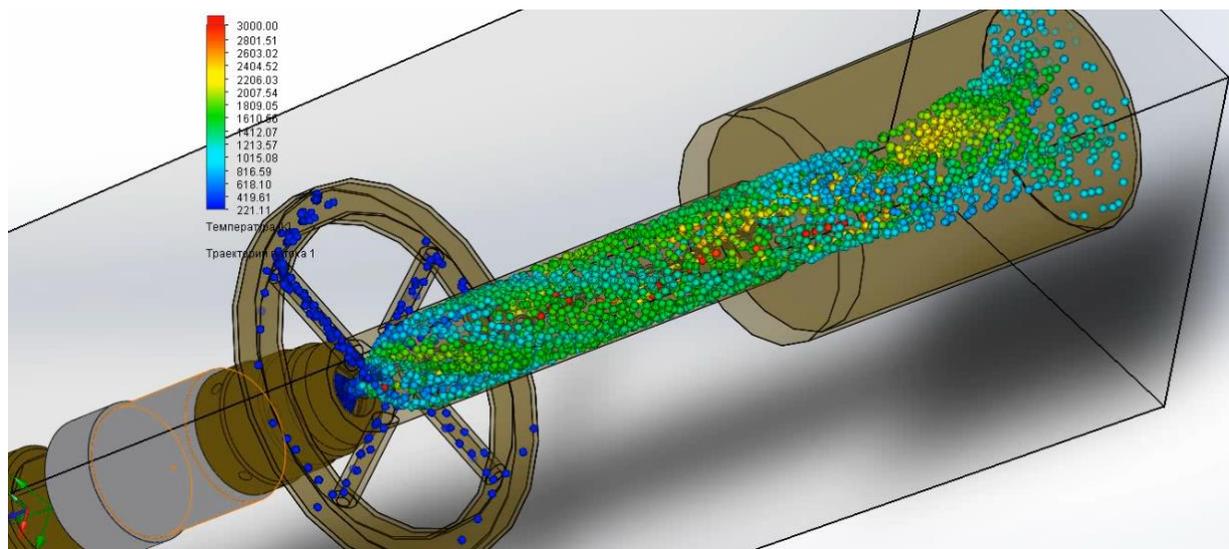


Рисунок 4. 3D-моделирование газодинамических процессов в камере смешения плазмотрона

Как показали расчеты, основной поток утилизируемого газа движется в КС по спиралевидной траектории (рис. 5), поэтому были сделаны оценки изменения кинематических параметров и вдоль характерной для такой траектории винтовой линии. В соответствии с распределением скоростей в камере смешения были выбраны параметры винтовой линии, по которой преимущественно движется поток утилизируемого газа: диаметр – 5 см, шаг – 8,5 см, длина одного витка – 20 см. Так как при винтовом характере движения газового потока расчет по прямолинейной траектории приводит к сильным осцилляциям параметров вдоль линии движения (рис. 6 и 7), применялся также расчет средних по сечению КС температур и скоростей. При расчете вдоль винтовой траектории наблюдались существенно меньшие осцилляции

газодинамических параметров (рис. 8), что подтверждает преимущественное распределение и характер движения утилизируемого газа в КС. При аппроксимации траектории винтовой линией оценки времени нагрева дают его примерно двукратное увеличение для наиболее удалённых от оси областей перемещения, а также примерно полуторное увеличение средней температуры вдоль траектории, которая для основной массы утилизируемого потока газа колеблется в диапазоне 3–5,5 тыс. К (рис. 9). Результаты расчетов газодинамических параметров и температур, а также критериев эффективности разложения диоксинов – в табл. 2 (нагрев «короткой» плазменной струей длиной в 90 мм) и в табл. 3 (нагрев «длинной» плазменной струей в 170 мм).

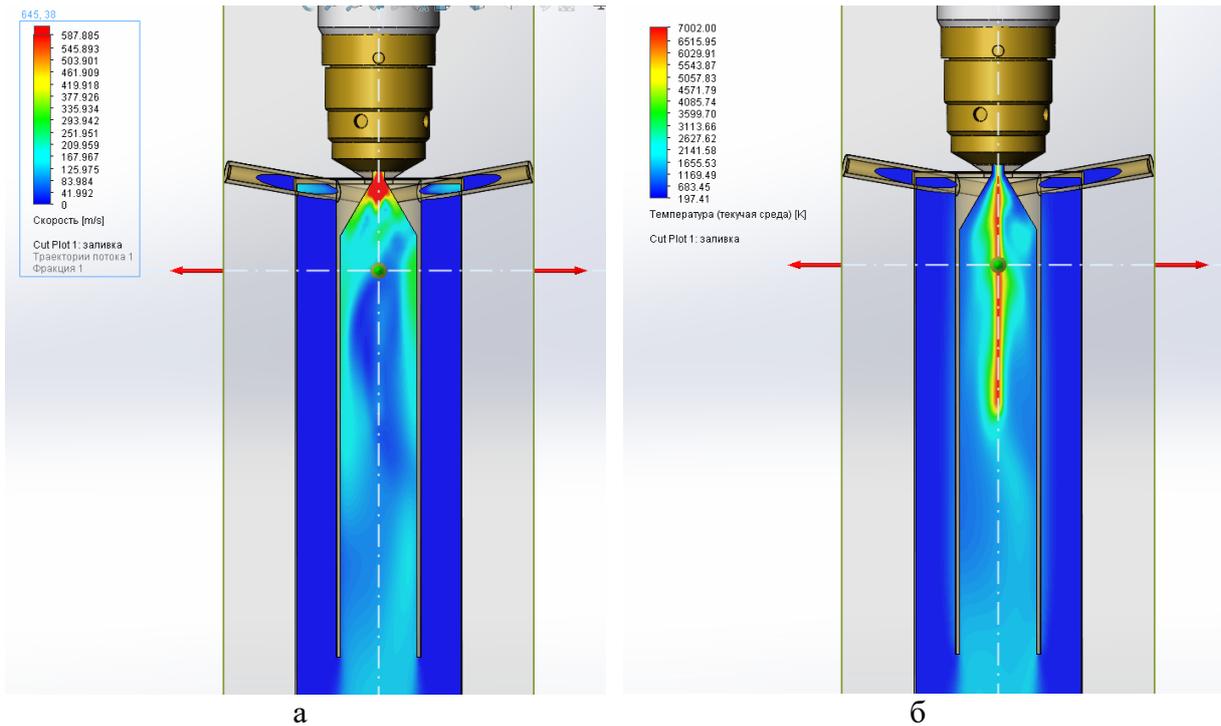


Рисунок 5. Результаты расчета газодинамических параметров в КС плазматрона: а – распределение скоростей, б – распределение температур

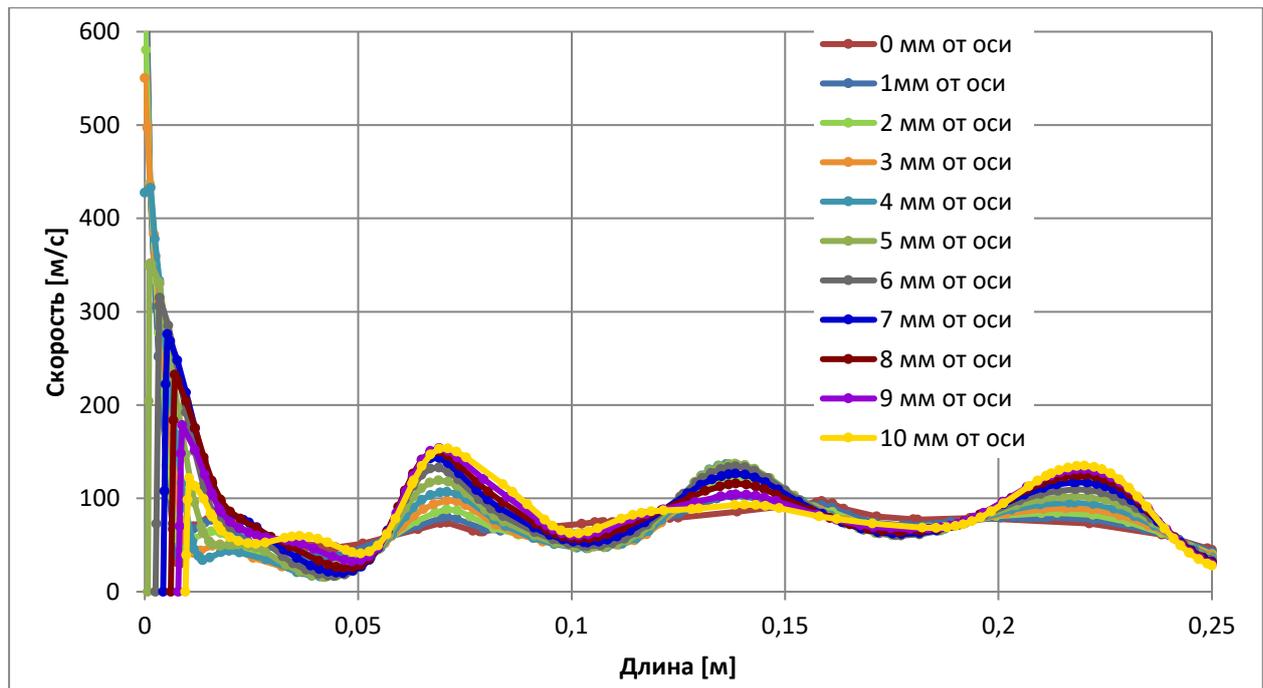


Рисунок 6. Распределение скоростей вдоль расчетных траекторий в КС плазматрона (плазменная дуга длиной 170 мм)

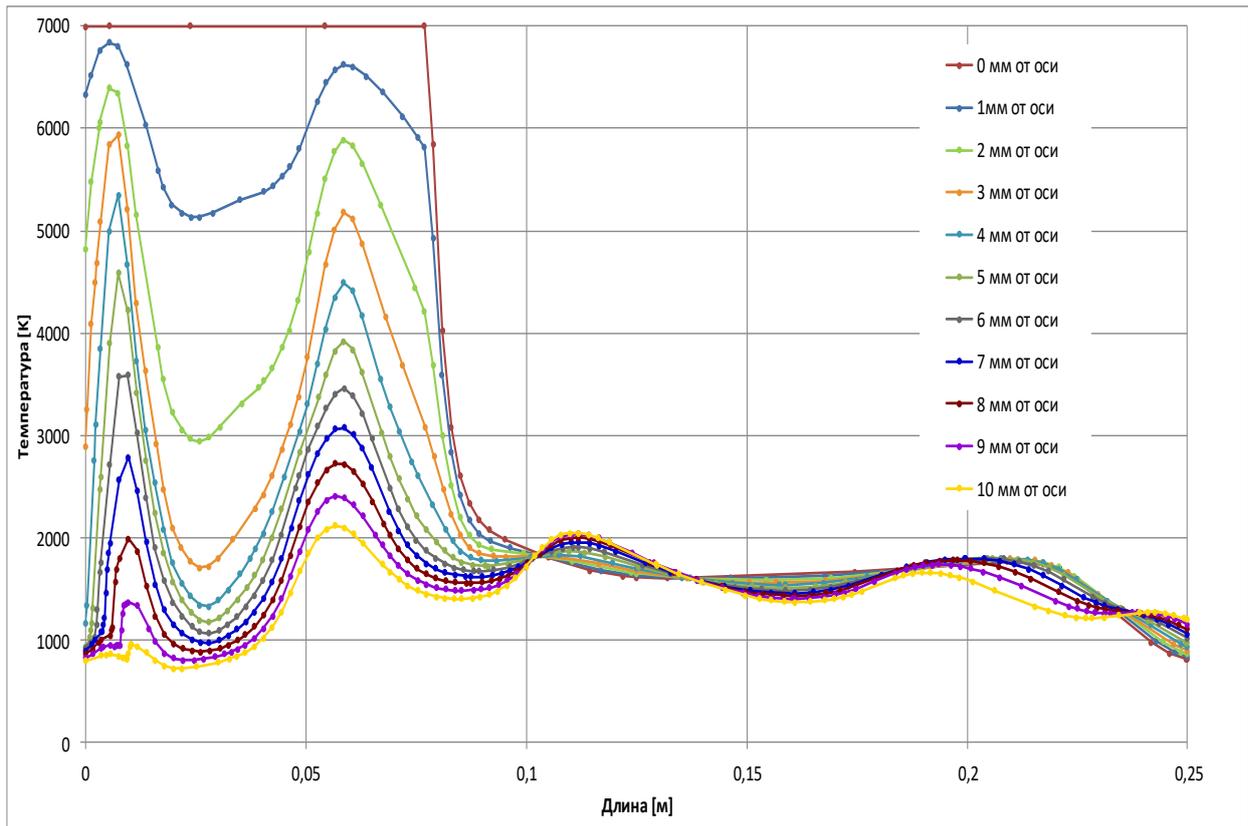


Рисунок 7. Распределение температур вдоль расчетных траекторий в КС плазмотрона (плазменная дуга длиной 170 мм)

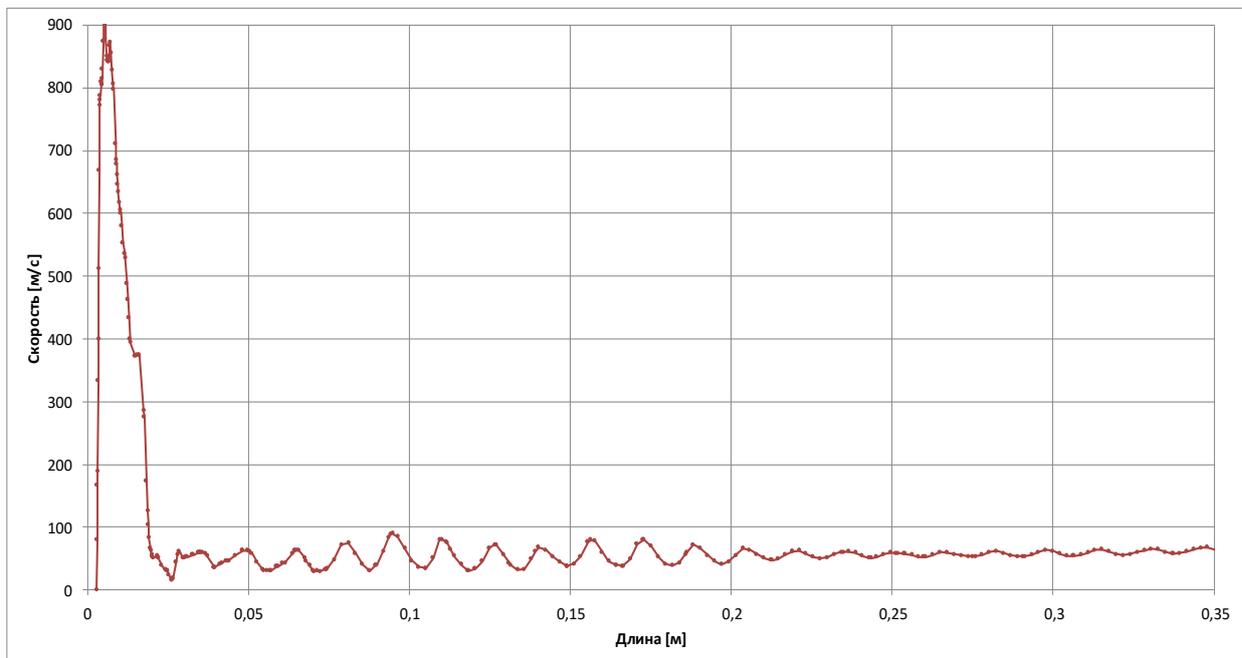


Рисунок 8. Распределение скоростей при расчете по винтовой траектории в КС плазмотрона (плазменная дуга длиной 90 мм)

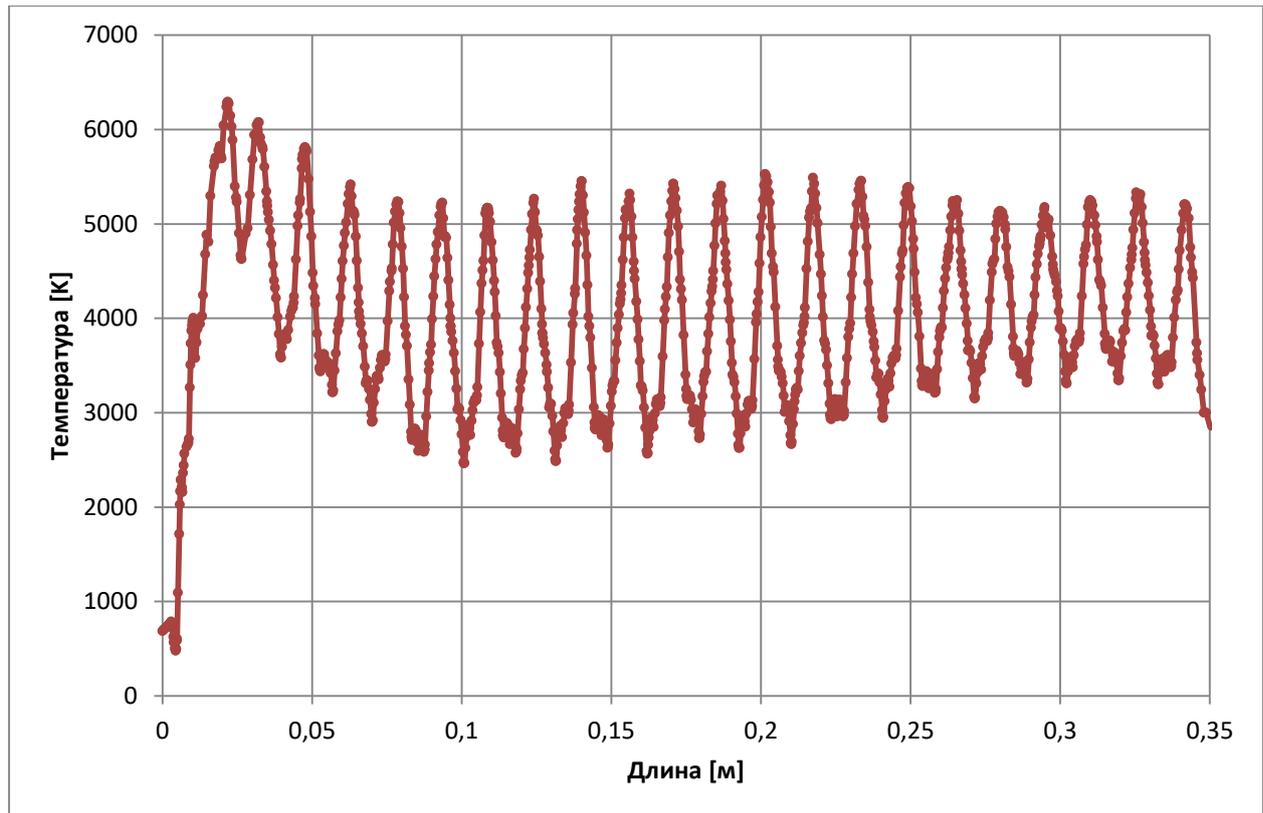


Рисунок 9. Распределение температур при расчете по винтовой траектории в КС плазмотрона (плазменная дуга длиной 170 мм)

Таблица 2
Распределение газодинамических параметров нагрева по траекториям (нагрев короткой дугой в 90 мм)

Z, мм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	⟨⟩	спираль
⟨V⟩, м/с	62,7	57,8	55,6	56,4	56,0	60,0	61,6	66,6	69,0	71,6	74,2	62,9	74,39
t, мс	4,29	4,32	4,43	4,57	4,57	4,55	4,32	4,43	4,23	4,03	3,86	4,3	6,38
⟨T⟩, тыс. К	2535	3962	3064	2467	2184	2059	1858	1729	1622	1530	1458	2224	3454
C1, тыс. К	14,7	23,1	17,9	14,5	12,8	12,1	10,8	10,1	9,4	8,8	8,3	13,0	21,5
C2	13,9	24,4	17,8	13,6	11,6	10,8	9,3	8,5	7,8	7,1	6,6	11,8	21,9

*Z – расстояние от оси КС (номер траектории), ⟨V⟩ – средняя скорость по траектории, t – время нагрева по траектории, ⟨T⟩ – средняя температура нагрева по траектории, ⟨⟩ – средние значения, C1 и C2 – критерии эффективности нагрева

Таблица 3
Распределение газодинамических параметров нагрева по траекториям
(нагрев длинной дугой в 170 мм)

Z, мм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	⟨⟩	спираль
⟨V⟩, м/с	77,6	80,5	83,3	87,3	89,1	88,8	90,1	91,0	90,1	88,9	89,4	86,9	86,0
t, мс	3,41	3,55	3,83	4,12	4,21	4,04	3,77	3,51	3,29	3,16	3,12	3,6	5,84
⟨T⟩, тыс. К	3,52	4,44	3,78	3,22	2,77	2,54	2,38	2,19	2,09	2,00	1,91	2,81	3,92
C1, тыс. К	19,7	25,0	21,6	18,6	16,1	14,6	13,5	12,3	11,6	11,0	10,5	15,8	24,0
C2	20,2	27,2	22,6	18,7	15,5	13,7	12,5	11,1	10,3	9,7	9,0	15,3	25,3

*Z – расстояние от оси КС (номер траектории), ⟨V⟩ – средняя скорость по траектории, t – время нагрева по траектории, ⟨T⟩ – средняя температура нагрева по траектории, ⟨⟩ – средние значения, C1 и C2 – критерии эффективности нагрева

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что увеличение длины плазменной струи в КС приводит к росту скорости газа (рис. 10), что закономерно сказывается на снижении времени нагрева (рис. 11). Однако при этом примерно на 500 К возрастает средняя температура газа во всех областях КС (рис. 12), в результате чего результирующая эф-

фективность разложения диоксинов оказывается на 30–40 % более высокой (по критериям C1 и C2 – см. табл. 2 и 3). Подобные выводы можно сделать и при анализе газодинамических параметров и температур нагрева, сделанном вдоль винтовой линии, что, как было отмечено ранее, соответствует движению основной массы утилизируемого газа в КС (см. табл. 2 и 3).

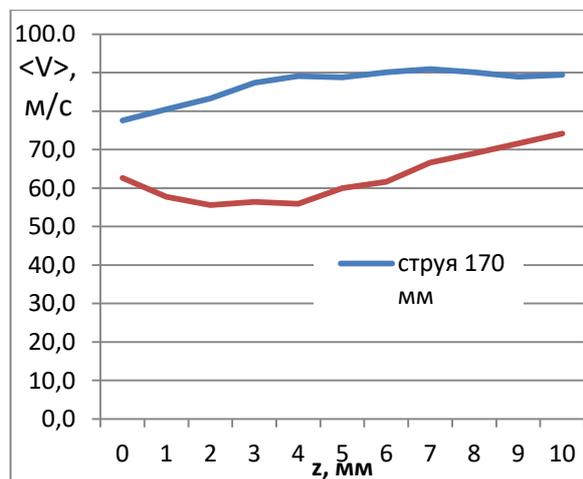


Рисунок 10. Распределение скоростей по траекториям в КС при нагреве короткой (90 мм) и длинной (170 мм) плазменной струей

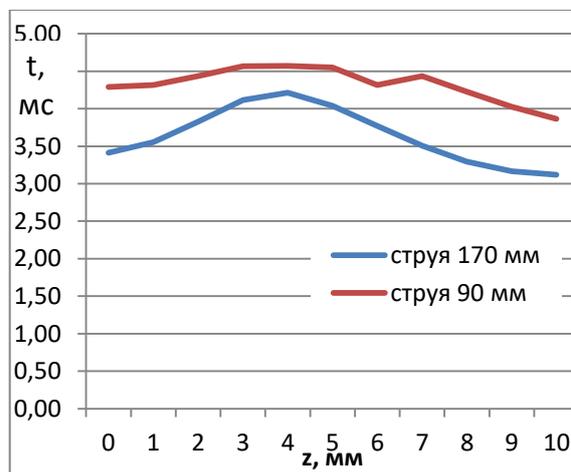


Рисунок 11. Распределение времен нагрева по траекториям в КС при нагреве короткой (90 мм) и длинной (170 мм) плазменной струей

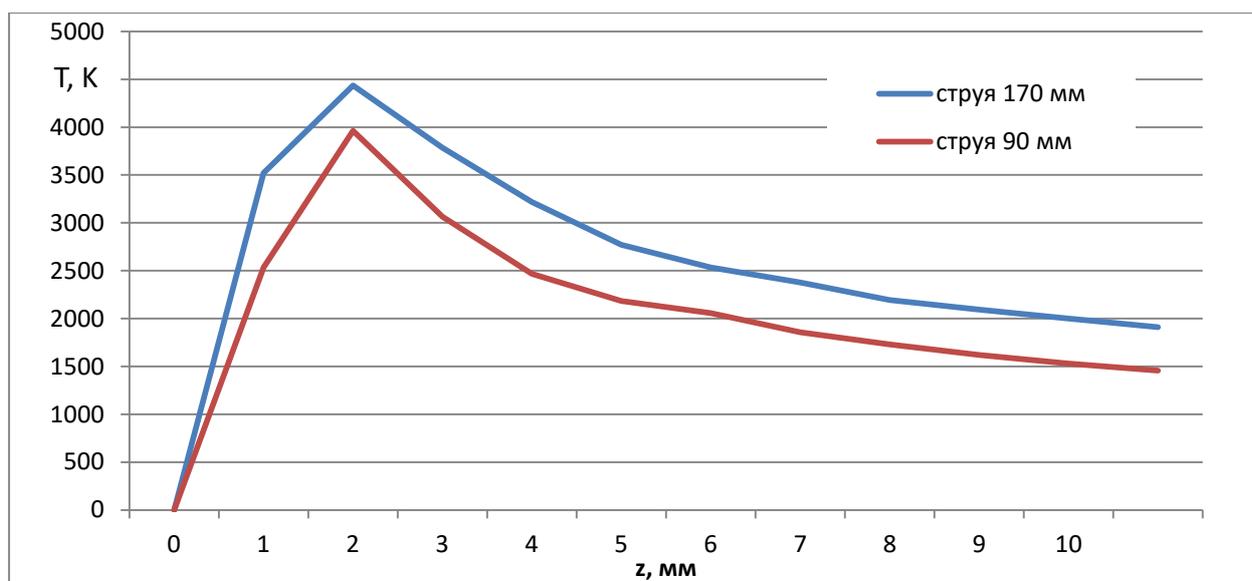


Рисунок 12. Распределение температур по траекториям в КС при нагреве короткой (90 мм) и длинной (170 мм) плазменной струей

Сравнение с полученными ранее результатами [12] для конструкций плазмоторона с цилиндрической и конфузальной камерами смешения при различных (от 0 до 30°) углах ввода утилизируемого газа по 2-м симметрично расположенным каналам также демонстрирует преимущества модернизированной технологии. Представленные на рис. 13 результаты расчета по линейным траекториям показывают увеличение на 13 % (при нагреве струей в 170 мм) и на 35 % (при сопоставимой по длине струей в 90 мм) времени нагрева при сопоставимых температурах нагрева. Оценки эффективности процесса, сделанные согласно введенным критериям С1 и С2 (рис. 14), говорят об увеличении эффективности для модернизированной технологии. Оценка по критерию С1 показывает эффективность процесса как при нагреве короткой (90 мм), так и длинной (170 мм) плазменной струей. Более строгие требования (одновременное выполнение критериев С1 и С2) однозначно определяет необходи-

мость применения длинной (170 мм) плазменной струи для обезвреживания диоксинов. Следует заметить, что расчеты, сделанные вдоль винтовой траектории (преимущественного направления движения утилизируемого газа), демонстрируют максимальные значения эффективности процесса (рис. 13 и 14). Очевидно, что дальнейшим направлением совершенствования рассматриваемой технологии должна стать её конструктивная оптимизация в соответствии с интегральными критериями эффективности обезвреживания и экономичности. В этой связи следует учесть такие параметры, как расход плазмообразующего и утилизируемого газа, углы подачи утилизируемого газа и геометрию камеры смешения, мощность источника питания, обеспечивающего горение плазменной струи в КС необходимой длины. Целесообразно также при проектировании технологии обезвреживания предусмотреть и камеру закалки перед выбросом газов в атмосферу.

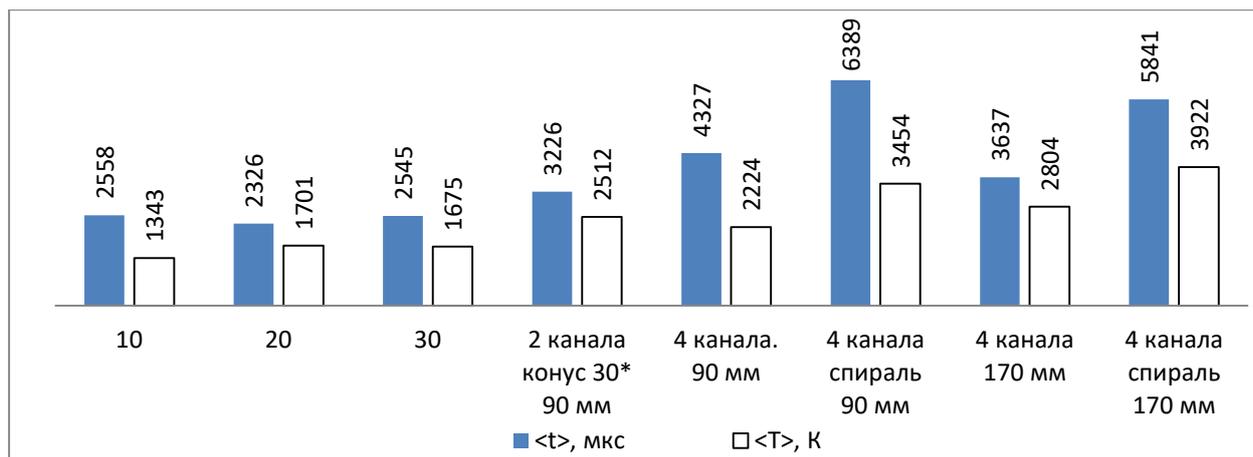


Рисунок 13. Средние значения времени и температуры нагрева для различных конструкций КС

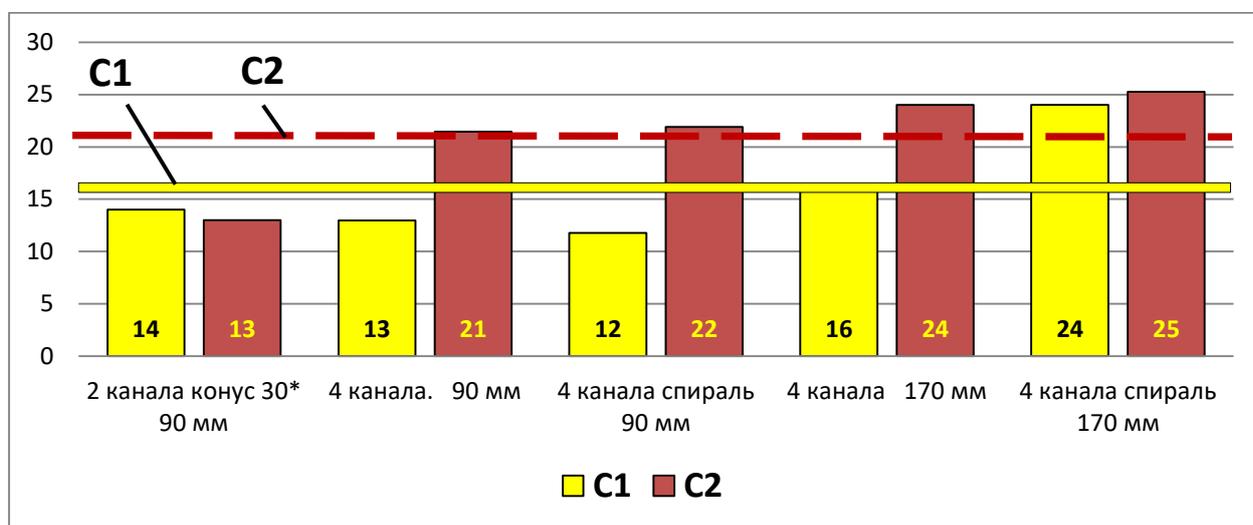


Рисунок 14. Критерии эффективности нагрева для различных конструкций КС

Представленные в данной работе результаты анализа модернизированной технологии плазменного дожигания газообразных продуктов переработки опасных отходов свидетельствуют об обоснованности данного способа обезвреживания на примере одного из наиболее опасного супертоксиканта – диоксина. Данная техно-

логия, как уже отмечалось ранее [12], обладает существенными преимуществами, по сравнению с известными технологиями высокотемпературного сжигания и обезвреживания отходов за счет скорости и эффективности процесса. Следует, однако, продолжить разработку и анализ данной экотехнологии с целью поиска оптимальных параметров её применения.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-08-00190

1. Чередниченко В. С., Аньшаков А. С., Кузьмин М. Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск, 2011. 602 с.
2. Chernets I., Nirenberg G., Fridman A., Rabinovich A. Development of high-power plasma reformer and power supply for large scale applications // 20th International Symposium on Plasma Chemistry, 2011.
3. Анахов С. В., Пыкин Ю. А. Экологическое проектирование: стратегии и технологии. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 125 с.
4. Анахов С. В., Пыкин Ю. А., Шакуров С. А. Системные принципы в решении задач экологической безопасности с применением плазменных технологий // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 4–9.
5. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. P. 978.
6. Анахов С. В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях. Екатеринбург, 2014. 144 с.
7. Гумерова Г. И., Гоголь Э. В., Васильев А. В. Новый подход к качественному и количественному определению диоксинов // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2014. Т. 16, № 1 (6). С. 1717–1719.
8. Ладьгин К. В. К вопросу предварительной оценки и методов снижения содержания диоксинов в отходящих газах установок термоокислительного обезвреживания медицинских отходов // Научный журнал НИУ ИТМО. 2014. № 2. С. 14–15.
9. Леонтьев Л. И. Перспективы утилизации твердых коммунальных отходов в РФ // Труды конгресса «ТЕХНОГЕН-2019». Екатеринбург, 2019. С. 18–24
10. Петров В. Г., Трубочёв А. В. Обезвреживание хлорорганических промышленных отходов без образования диоксинов // Вестник Удмуртского университета. Серия Физика и химия. 2012. № 3. С. 64–68.
11. Технологии обеззараживания. URL: <http://www.seu.ru/cci/lib/books/dioksiny/8/02.htm>.
12. Анахов С. В., Пыкин Ю. А., Матушкин А. В. Моделирование процессов плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обезвреживания отходов // Техносферная безопасность. 2019. № 1. С. 129–141.
13. Пыкин Ю. А., Анахов С. В., Шакуров С. А. Патент РФ №67909 на полезную модель «Плазмотрон» от 22.05.2007.

References

1. Cherednichenko V. S., An'shakov A. S., Kuz'min M. G. Plazmennyye ehlektrotekhnologicheskie ustanovki (Plasma electrotechnological installations). Novosibirsk, 2011. 602 p.
2. Chernets I., Nirenberg G., Fridman A., Rabinovich A. Development of high-power plasma reformer and power supply for large scale applications // 20th International Symposium on Plasma Chemistry, 2011.
3. Anakhov S. V., Pykin Yu. A. Ekologicheskoe proektirovanie: strategii i tekhnologii (Ecological designing: strategy and technologies). Saarbrücken, 2012. 125 p.
4. Anakhov S. V., Pykin Yu. A., Shakurov S. A. Sistemnyye principy v reshenii zadach ehkologicheskoy bezopasnosti s primeneniem plazmennyykh tekhnologiy (System principles in the decision of ecological safety problems-with application of plasma technologies) // Ecology and the industry of Russia. 2014. № 1. P. 4–9.
5. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. P. 978.
6. Anakhov S.V. Printsipy i metody proektirovaniya v ehlektroplazmennyykh i svarochnykh tekhnologiyakh. Ekaterinburg, 2014. 144 s.
7. Gumerova G. I., Gogol` E`.V., Vasil`ev A. V. Novy`j podhod k kachestvennomu i kolichestvennomu opredeleniyu dioksinov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj Akademii nauk. 2014. T. 16, № 1 (6). S. 1717–1719.
8. Lady`gin K. V. K voprosu predvaritel`noj ocenki i metodov snizheniya soderzhaniya dioksinov v othodyashhih gazah ustanovok termookislitel`nogo obezvrezhivaniya medicinskih othodov // Nauchny`j zhurnal NIU ITMO. 2014. № 2. S. 14–15.
9. Leont`ev L. I. Perspektivy` utilizacii tverdyy`h kommunal`ny`h otxodov v RF // Trudy` kongressa «TEHNOGEN-2019». Ekaterinburg, 2019. S. 18–24.
10. Petrov V. G., Trubachyov A. V. Obezvrezhivanie hlororganicheskikh promy`shlenny`h othodov bez obrazovaniya dioksinov // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Fizika i himiya, 2012. № 3. S. 64–68.
11. Tehnologii obezzarazhivaniya. URL: <http://www.seu.ru/cci/lib/books/dioksiny/8/02.htm>.
12. Anakhov S. V., Py`kin Yu. A., Matushkin A. V. Modelirovanie processov plazmennoj insineracii v tekhnologiyah utilizacii i obezvrezhivaniya othodov (Modeling of the plasma incineration technology of waste utilization and neutralization) // Tehnosfernaya bezopasnost`. 2019. № 1. S. 129–141.
13. Pykin YU. A., Anakhov S. V., SHakurov S. A. Patent RF №67909 na poleznuyu model' «Plazmotron» 22.05.2007.