

УДК 621.454.2.018

А. Ф. Шейко, И. П. Петренко, П. Е. Днепров, С. А. Иванов

## ПЕРСПЕКТИВНОЕ ГАЗООЧИСТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ЖРД

*Рассмотрен проект перспективного комплексного газоочистного устройства для испытательного стенда крупногабаритных ЖРД. Представлены прогностические математические модели оценки экологических показателей комплексного газоочистного оборудования.*

*Розглянуто проект перспективного комплексного газоочистного пристрою для випробного великогабаритного РРД. Подано прогностичні математичні моделі оцінювання екологічних показників комплексного газоочистного обладнання.*

*The paper considers the project of prospective integrated gas purification device for large-sized LRE test stand. The prognostic mathematical models are presented for evaluation of ecological indices of the integrated gas purification equipment.*

К процессу отработки современного ЖРД предъявляются требования минимизации вредного воздействия на окружающую среду при стендовых испытаниях.

Для двигателя РД815 на жидком кислороде и керосине разработан проект комплексного газоочистного устройства (КГОУ), позволяющего снизить выбросы вредных веществ в атмосферу и уменьшить уровень шума.

Указанного эффекта предполагается достичь за счет дозированного разбавления струи продуктов сгорания в КГОУ воздухом и впрыском воды, обеспечивающими дожигание (термохимическую нейтрализацию) вредных составляющих продуктов сгорания до экологически безопасных веществ.

Комплексное газоочистное устройство состоит из входной трубы, дожигателя, газоотводящего тракта шатрового типа и системы охлаждения КГОУ.

Расчетное обоснование принятых проектных решений было выполнено с использованием разработанных математических моделей.

### Математическая модель оценки выбросов продуктов сгорания

При оценке термодинамических параметров струи учитывалось изменение теплосодержания смеси за счет подведенного

(отведенного) в процессах смешения тепла:

- охлаждение струи эжектируемым воздухом из окружающей среды;
- подогрев поступающего в КГОУ на входе в тракт  $\varnothing$  3,6 м воздуха от высокотемпературной центральной части потока по длине соответствующего тракта;
- охлаждение струи за счет впрыска воды на выходе из тракта  $\varnothing$  3,6 м (с добавкой расхода воды на выходе из тракта  $\varnothing$  7,2 м).

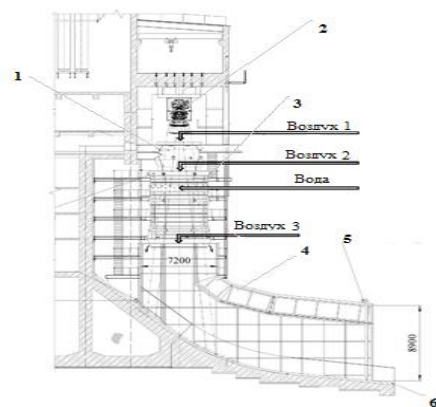


Рис. 1. Схема охлаждения струи продуктов сгорания топлива:

1 – входная труба  $\varnothing$  3,6 м; 2 – ракетный двигатель; 3 – дожигатель КГОУ  $\varnothing$  5,0 м; 4 – газоотводящий тракт шатрового типа  $\varnothing$  7,2 м на входе; 5 – коллектор воды на шумоглушение; 6 – лоток; воздух 1, 2, 3 – воздух, эжектируемый на входах в участки КГОУ диаметром  $\varnothing$  3,6; 5,0 и 7,2 м соответственно

Предполагалось, что на начальном участке сверхзвуковой струи продуктов сгорания (до места расположения скачка уплотнения) теплообмен струи и окружающего воздуха происходит только за счет теплового излучения.

Место расположения скачка уплотнения определяли по зависимости

$$\left(\frac{P_n}{P_\varepsilon}\right) \geq \left(\frac{P_n}{P_\varepsilon}\right)_{кр}$$

где  $P_n$  – давление на границе струи;  
 $P_\varepsilon$  – давление окружающей среды (воздуха);

$$\frac{P_n}{P_\varepsilon} = f(D_{отн});$$

$$D_{отн} = \frac{D_{стр}}{d_{кр}}$$

Значение  $\left(\frac{P_n}{P_\varepsilon}\right)_{кр}$  находили по эмпирической зависимости

$$\left(\frac{P_n}{P_\varepsilon}\right)_{кр} = 0,7131D_{отн}^{0,5168}$$

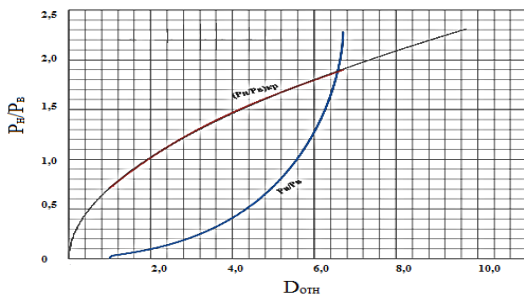


Рис. 2. Место расположения скачка уплотнения в струе двигателя

Основные термодинамические параметры определяли по формулам [1, 2]

$$U = \frac{G_u}{G_p};$$

$$C_{P_{см}} = \frac{C_{P_p} + UC_{P_u}}{1 + U};$$

$$R_{см} = \frac{R + UR}{1 + U};$$

$$T_{см} = \frac{T + UT \pm f(Q_{доп})}{1 + U};$$

$$k_{см} = \frac{\frac{k_p}{k_p - 1} + U \frac{k_u}{k_u - 1} \cdot \frac{R_u}{R_p}}{\frac{1}{k_p - 1} + U \frac{1}{k_u - 1} \cdot \frac{R_u}{R_p}};$$

$$\pi_i = \left(\frac{2}{k_i + 1}\right)^{\frac{k_i}{k_i - 1}} \quad (i:=p, u, см).$$

В приведенных формулах использованы следующие обозначения:

- $G$  – массовые расходы потоков, кг/с;
- $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении, ккал/(кг·К);
- $R$  – газовая постоянная, ккал/(кг·К);
- $T$  – температура, К;
- $Q$  – тепловой поток, ккал/с;
- $k$  – соотношение теплоемкостей,  $k=C_p/C_v$ .

Индексы:

- $u$  – эжектируемый поток;
- $p$  – рабочий поток (струя, не смешанная с воздухом);
- $см$  – смешанный поток;
- $доп$  – дополнительное (тепло);
- $кр$  – критические параметры.

Результаты расчетов параметров смешанного потока по сечениям газового тракта приведены в табл. 1.

С использованием приведенных значений термодинамических параметров расчеты состава смеси газов на выходе из КГОУ проведены с использованием программного комплекса АСТРА [3] для двух случаев:

1) с учетом взаимодействия струи продуктов сгорания двигателя с водой и воздухом. Двигатель работает на номинальном режиме;

2) без учета взаимодействия струи продуктов сгорания двигателя с водой и воз-

духом при его запуске и в процессе останова.

Для случая 1, учитывая относительно низкие расчетные значения температуры смеси на выходе из КГОУ, расчеты по

оценке состава продуктов сгорания проведены для значений температуры от 300 до 800 К. В составе истекающих из КГОУ газов отсутствуют конденсированный углерод (сажа) и токсичные окислы CO и NO<sub>x</sub>.

Таблица 1

Параметры смешанного потока по сечениям газового тракта

Параметр	Значение				
Камера сгорания					
Давление в камере сгорания $P_K$ , кгс/см <sup>2</sup>	200	200	200	200	200
Расход продуктов сгорания из двигателя $G_p$ , кг/с	819	819	819	819	819
Температура продуктов сгорания (торможения – с учетом потерь ~15,0 % на скачке уплотнения) $0,85 T_{KC}$ , К	3269	3269	3269	3269	3269
Смешанный поток в тракте Ø 3,6 м					
Эжектируемый воздух					
Расход воздуха, эжектируемого в тракт Ø 3,6 м $G_{1_0}$ , кг/с	3089	3089	3089	3089	3089
Коэффициент эжекции $U_1$	3,77	3,77	3,77	3,77	3,77
Расход смеси на выходе из тракта Ø 3,6 м $G_{1_{см}}$ , кг/с	3909	3909	3909	3909	3909
Температура смеси на выходе из тракта Ø 3,6 м (без подогрева воздуха, до подачи воды) $T_{1_0}$ , К	1933	1933	1933	1933	1933
Смешанный поток в тракте Ø 5,0 м					
Охлаждение водой					
Расход впрыскиваемой воды $G_{вода}$ , кг/с	1000	1100	1200	1400	1600
Расход смеси на выходе из тракта Ø 3,6 м (включая воду) $G_{см}$ , кг/с	4909	5009	5109	5309	5509
Температура смеси на выходе из тракта Ø 3,6 м (с подогревом воздуха, до подачи воды) $T_{1_{см+подгр}}$ , К	2032	2032	2032	2032	2032
Температура смеси на выходе из тракта Ø 3,6 м (с учетом перемешивания с паром воды) $T_{см+пар}$ , К	1600	1574	1549	1502	1458
Температура смеси на выходе из тракта Ø 3,6 м (с учетом теплоты испарения воды) $T_{см+вода}$ , К	1523	1491	1460	1402	1348
Смешанный поток					
Расход воздуха, эжектируемого в тракт Ø 5,0 м $G_{2_{возд}}$ , кг/с	2541	2541	2541	2541	2541
Расход воздуха на выходе из тракта Ø 5,0 м $G_{2_{см}}$ , кг/с	7460	7560	7660	7860	8060
Температура смеси на выходе из тракта Ø 5,0 м $T_{2_{см}}$ , К	1106	1090	1075	1045	1017
Смешанный поток в тракте Ø 7,2 м					
Расход воздуха, эжектируемого в тракт Ø 7,2 м $G_{3_{возд}}$ , кг/с	5433	5433	5433	5433	5433
Расход воздуха на выходе из тракта Ø 7,2 м $G_{3_{см}}$ , кг/с	12893	12993	13093	13293	13493

Параметр	Значение				
Температура смеси на выходе из тракта $\varnothing 7,2$ м $T_{3_{см}}$ , К	765	759	752	740	728

Для случая 2 состав продуктов сгорания рассчитывался в диапазоне температур от 300 до 3800 К.

По результатам расчетов, представленных на рис. 3, при низких температурах ( $T \leq 700$  К) в продуктах сгорания присутствуют конденсированный углерод и газообразная окись углерода CO.

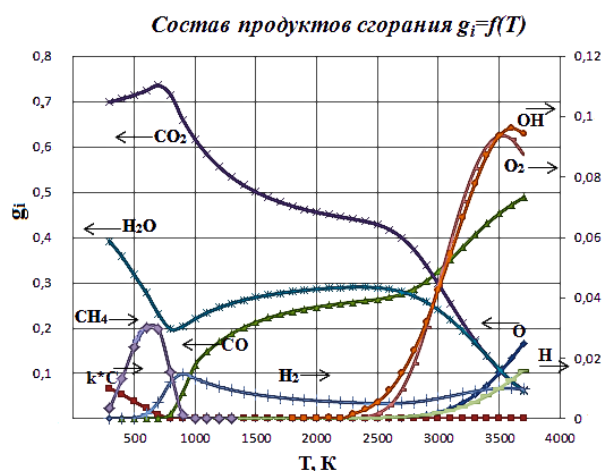


Рис. 3. Состав (массовые доли в рабочем теле) продуктов сгорания в струе, истекающей из сопла двигателя при его запуске и в процессе останова, в зависимости от температуры среды

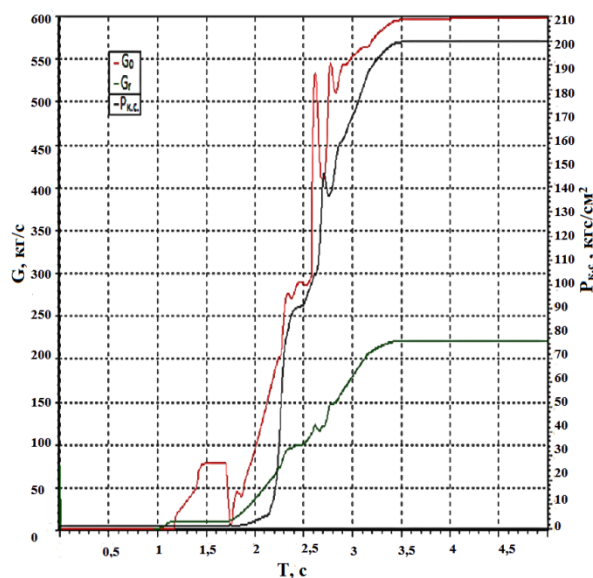


Рис. 4. Диаграмма изменения давления в камере сгорания и расходов компонентов топлива

через двигатель при номинальном запуске

При оценке загрязнения воздуха выброс вредных веществ на режиме запуска не учитывался вследствие кратковременности (менее 1 с) реализации массовозначимых расходов компонентов (рис. 4) и смешения выброса с основной струей и последующего догорания.

Для обеспечения «оценки сверху» выбросов на участке спада (рис. 5) в качестве исходных данных принимали максимальные из возможных значения выбрасываемых масс сажи и окиси углерода в диапазоне температур от 300 до 600 К.

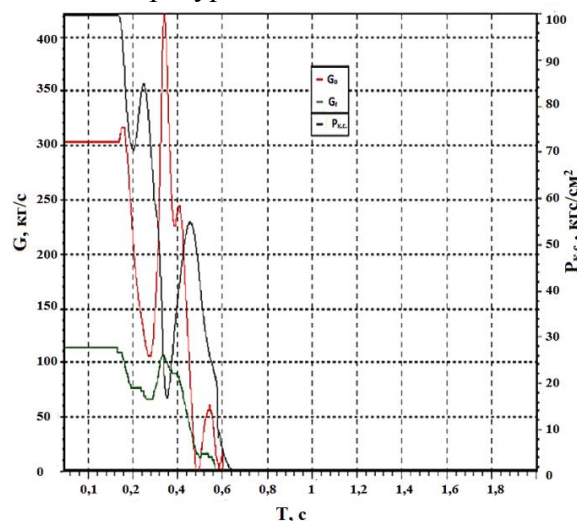


Рис. 5. Диаграмма изменения давления в камере сгорания и расходов компонентов топлива через двигатель при выключении

Не учитывалось осаждение сажи за счет впрыска воды в выходном сечении КГОУ и взаимодействия струи с подстилающей поверхностью. По опыту проведения испытаний аналогичных изделий осаждение сажи уменьшает выброс в атмосферу от 20 до 50%.

Принято, что истекающая из КГОУ струя тормозится при натекании на наклонную часть лотка стенда и расположенный за ней холм.

Расчет загрязнения приземного слоя воздуха сажей и окисью углерода, выброшен-

ными на режиме останова, выполнялся в рамках модели Гаусса мгновенного источника по формуле [4]

$$C(x,y,z,t) = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot qF}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \times \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right],$$

- где  $C(x, y, z, t)$  – концентрация, мг/м<sup>3</sup>;  
 $q$  – выброс (окиси углерода, сажи) кг;  
 $t$  – время, прошедшее после выброса;  
 $x, y, z$  – эйлеровы координаты точки в пространстве;  
 $F$  – функция сухого осаждения, вычисленная в соответствии с рекомендациями [2];  
 $u$  – скорость ветра, м/с;  
 $h$  – высота облака выброса над землей на расстоянии  $x$  от выброса, м;  
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – стандартные отклонения распределения примеси в облаке выброса в направлении соответствующих координатных осей, м.

Стандартные отклонения характеризуются монотонно возрастающей функцией расстояния. Их вид и значения зависят от погодных условий (категорий А...F) [4].

Оценки проводились для различных метеорологических условий по категориям устойчивости атмосферы А...F (интенсивности атмосферной диффузии токсиканта).

Скорости ветра, характерные для категорий устойчивости атмосферы по Пасквиллу, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения скоростей ветра

Категория устойчивости атмосферы	A	B	C	D	E	F
	Неустойчивая стратификация атмосферы					
Нейтральная стратификация атмосферы						
Устойчивая стратификация атмосферы						
Характерная скорость, м/с	1	2	5	5	3	2

Результаты расчетов представлены на рис. 6.

Область сверхнормативного загрязнения (свыше ПДК) имеет форму эллипса, большая полуось  $a$  которого направлена по направлению ветра. Меньшая полуось  $b$  перпендикулярна направлению ветра.



Рис. 6. Рассеивания выбросов из КГОУ:

ПДК – предельно допустимая концентрация токсичного компонента в атмосферном воздухе; ПДК<sub>р.з</sub> – предельно допустимая концентрация токсичного компонента в атмосферном воздухе рабочей зоны

### Математическая модель оценки уровня шума при испытаниях

Основным источником шума при испытаниях является реактивная струя выхлопных газов из КГОУ.

Звуковая мощность струи в диапазоне скоростей истечения при  $0,5 < M < 1,5$  вычисляется по формуле [5]

$$L_0 = 80 \lg U_c + 10 \lg S + 20 \lg \rho_c + L_p,$$

- где  $U_c$  – скорость истечения струи, м/с;  
 $S$  – площадь выходного сечения, м<sup>2</sup>;  
 $\rho_c$  – плотность продуктов сгорания

ния струи, кг/м<sup>3</sup>;  
 $L_p$  – добавочная мощность для горячих струй, дБА (-44 дБА).

Исходные данные для расчета звуковой мощности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные				
$U_c$	$M$	$\rho_c$	$\rho_e$	$S$
724,8	0,72	0,15	1,29	27,24

В табл. 3  $M$  – число Маха, а  $\rho_e$  – плотность воздуха.

Октавные уровни звуковой мощности шума струи определяются по формуле

$$L_p = L_0 - \Delta L_p,$$

где  $\Delta L_p$  – разность между общим уровнем звуковой мощности и уровнем звуковой мощности в рассматриваемой октавной полосе со среднегеометрической частотой  $f$  [6].

Октавные уровни звукового давления  $L$ , дБ, в расчетных точках, когда источник шума и расчетные точки расположены на открытом воздухе, определяют по формуле [5]

$$L = L_p + 10 \lg F - 10 \lg \lambda - 20 \lg x - \frac{\beta_0 x}{1000} + \Delta_1 - \Delta_2,$$

где  $L_p$  – октавный уровень звуковой мощности источника шума, дБ;

$F$  – фактор направленности;

$\lambda$  – пространственный угол (в стерадианах), в который излучается шум ( $\lambda=2\pi$ );

$x$  – расстояние от источника шума до расчетной точки, м;

$\beta_0$  – коэффициент поглощения звука в воздухе, дБ/км;

$\Delta_1$  – повышение уровня звукового давления вследствие отражения звука от больших поверхностей, расположенных на расстоянии от расчетной точки;

$\Delta_2$  – дополнительное снижение уровня звукового давления элементами окружающей природной среды ( $\Delta_2 = 10$  – для зеленых насаждений, леса).

Значения параметров  $F$ ,  $\beta_0$ ,  $\Delta_1$  для акустического расчета взяты из [5, 7].

За счет впрыска воды в газовую струю происходит снижение звуковой мощности в среднем на 3 дБ.

Результаты расчета уровня звука в зависимости от угла направленности излучения  $\Theta$  (отсчитывается от оси струи) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет уровня звука  $L$  (допустимый уровень звука равен 80 дБА)

$x$ , м	$\Theta$ , град												
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
25	121	122	126	128	121	116	113	111	109	108	108	108	107
50	113	114	118	120	113	108	105	103	102	101	100	100	100
100	104	105	109	111	104	99	96	94	92	91	91	91	90
200	92	92	97	98	92	87	84	81	80	79	79	78	78
500	82	83	87	89	82	77	74	72	70	69	69	69	68
1000	73	74	78	80	73	68	65	63	62	61	60	60	60

Примечание. Цветом выделены участки превышения допустимого уровня шума.

### Выводы

1. Разработаны математические прогно-

стические модели оценки вредных выбросов и шума КГОУ.

2. Конструктивное исполнение КГОУ

по результатам прогностических оценок с использованием разработанных моделей позволит исключить выбросы вредных веществ на основном режиме работы двигателя при испытаниях.

3. При запуске и остановке двигателя прогнозируется выброс небольшого количества окиси углерода и сажи. Указанные выбросы не представляют опасности для окружающей природной среды.

4. По результатам расчетов при работе двигателя возникает превышение допустимого уровня звука на расстоянии до 500 м.

#### **Список использованной литературы**

1. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

2. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2-х ч. Ч. 1: Учеб. руководство для втузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:

Наука, 1991. – 600 с.

3. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4 pc). Версия 1:16. Описание применения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 51 с.

4. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 255 с.

5. Борьба с шумом на производстве: Справочник/ Под общ. ред. Е. Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

6. Расчеты и измерения характеристик шума, создаваемого в дальнем звуковом поле реактивными самолетами/ Под ред. Л. И. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1968. – 100 с.

7. ГОСТ 31295.2-2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности. Ч. 2. Общий метод расчета. – 35 с.

Статья поступила 05.07.2016