

УДК 621.454.3:502.7

А. В. Соколов, А. Ф. Шейко, В. С. Фоменко, А. С. Кириченко

К ВОПРОСУ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Представлены математические модели и выполнены расчеты загрязнения нижней атмосферы продуктами сгорания твердого топлива, шумового и теплового воздействий на окружающую среду в районе расположения стенда. На основании ранее выполненных натурных исследований и полученных результатов дана оценка экологической безопасности испытаний.

Подано математичну модель і виконано розрахунки забруднення нижньої атмосфери продуктами згорання твердого палива, шумової та теплової дії на довкілля в районі розташування стенда. На підставі раніше виконаних натурних досліджень і отриманих результатів дано оцінку екологічної безпеки випробувань.

The mathematical models are presented and the calculations are made of lower atmosphere contamination with solid propellant combustion products, noise and thermal effects on environment in the test bench area. Based on earlier field investigations and on the results obtained, the assessment is given of ecological safety of the tests.

К процессу отработки современного ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) предъявляются требования по минимизации вредного воздействия на окружающую среду при стендовых испытаниях.

Целью настоящей статьи является расчетно-теоретическая оценка показателей экологической безопасности стендовых испытаний перспективных маршевых твердотопливных двигательных установок на стенде Павлоградского механического завода.

Описание стенда

Испытания маршевой твердотопливной двигательной установки (МТДУ) планируется проводить в рабочей зоне площадки № 3 ПМЗ.

Рабочая зона представляет собой огневой двор размером 100×22 м со стапелем, на котором размещается МТДУ. Двор покрыт металлическими плитами. По периметру двора выполнена обваловка высотой 10 м, с внутренней стороны облицованная бетонными плитами.

Расстояние от стапеля до обваловки – 66 м, МТДУ устанавливаются на высоте 2,5 м над уровнем пола. Расстояния от стенда до ближайших населенных пунктов приведены в табл. 1.

Основные критерии (нормы) экологической безопасности, по которым прово-

дится оценка и нормирование факторов воздействия

Основными факторами воздействия стендовых испытаний МТДУ на окружающую среду являются:

- выбросы продуктов сгорания;
- шумовое воздействие;
- тепловое воздействие струи.

Критерии (нормы), по которым проводится оценка и нормирование факторов воздействия, представлены в табл. 2 [1-3].

Оценка загрязнения нижней атмосферы продуктами сгорания твердого топлива

МТДУ выполнена по моноблочной схеме с зарядом твердого топлива, прочно скрепленным с корпусом.

Заряд МТДУ изготавливают из смеси твердого топлива следующего состава:

- ПХА – 64,7%;
- Al – 18,9%;
- связка – 16,4% (на основе диенового каучука).

Испытательный стенд не имеет улавливающих или очистных устройств, поэтому при испытаниях в атмосферу выбрасывается значительное количество газообразных и аэрозольных продуктов сгорания топлива. По результатам термогазодинамического расчета состава продуктов сгорания на срезе сопла МТДУ выделены вещества, оказы-

вающие вредное воздействие на окружающую среду (табл. 3).

Таблица 1

Населенные пункты, попадающие при определенном направлении ветра в зону кратковременного загрязнения приземного слоя атмосферы при категориях устойчивости атмосферы Е, F

Направление от стенда	Наименование населенного пункта	Расстояние, км	Вероятность попадания в зону загрязнения (по розе ветров и результатам расчета)
С	Павлоград	4,6	0,097
СВ	Богуслав	4,4	0,13
	Терновка	11,8	
В	Олефировка	8,3	0,167
	Самарское	9,7	
ЮВ	Бажаны	10,7	0,169
	Очереватое	13,3	
Ю	Левадки	4,5	0,086
ЮЗ	Преображенское	14,5	0,093
	Первомайское	12,2	
	Великоалександровка	6,2	
	Воскресеновка	11,1	
З	Троицкое	6,7	0,108
СЗ	Малоалександровка	11,1	0,15
	Приволчанское	7,4	

Согласно результатам расчетов газодинамических параметров струи продуктов сгорания и термодинамики догорания (окисления) продуктов выброса в струе за счет подсоса воздуха газообразная окись углерода CO, содержание которой на срезе сопла составляет $\approx 31\%$ (по массе), полностью окисляется (выгорает) до CO₂ кислородом воздуха. Содержание CO на расстоянии ≈ 60 м от среза сопла двигателя ($V \leq 5$ м/с, $T = 550-600$ К) близко к нулю.

В струе и в процессе формирования, всплытия и остывания облака выбросов до

температуры окружающей среды масса хлористого водорода не изменяется. Его концентрация в воздухе определяется показателями атмосферной диффузии.

Таблица 2

Нормирование вредных факторов

Критерий оценки допустимости, норматив	Предельно допустимая концентрация токсичного компонента в атмосферном воздухе (ПДК _{р.з.}), мг/м ³	Класс опасности
Выбросы в атмосферу		
Окись углерода CO	20	4
Хлористый водород (соляная кислота) HCl	5	2
Окись алюминия Al ₂ O ₃ (аэрозоль фиброгенного действия)	6	4
Шумовое воздействие		
Предельно допустимый уровень шума	На постоянном рабочем месте – 80 дБА; кратковременного непостоянного импульсного шума – 125 дБА	
Тепловое воздействие		
Болевой порог	1,4 кВт/м ²	

Таблица 3

Продукты сгорания топлива, оказывающие вредное воздействие на окружающую среду

Химическая формула продукта сгорания	Массовая доля на срезе сопла МТДУ
HCl	0,1985
CO	0,3106
Конденсат Al ₂ O ₃	0,3569

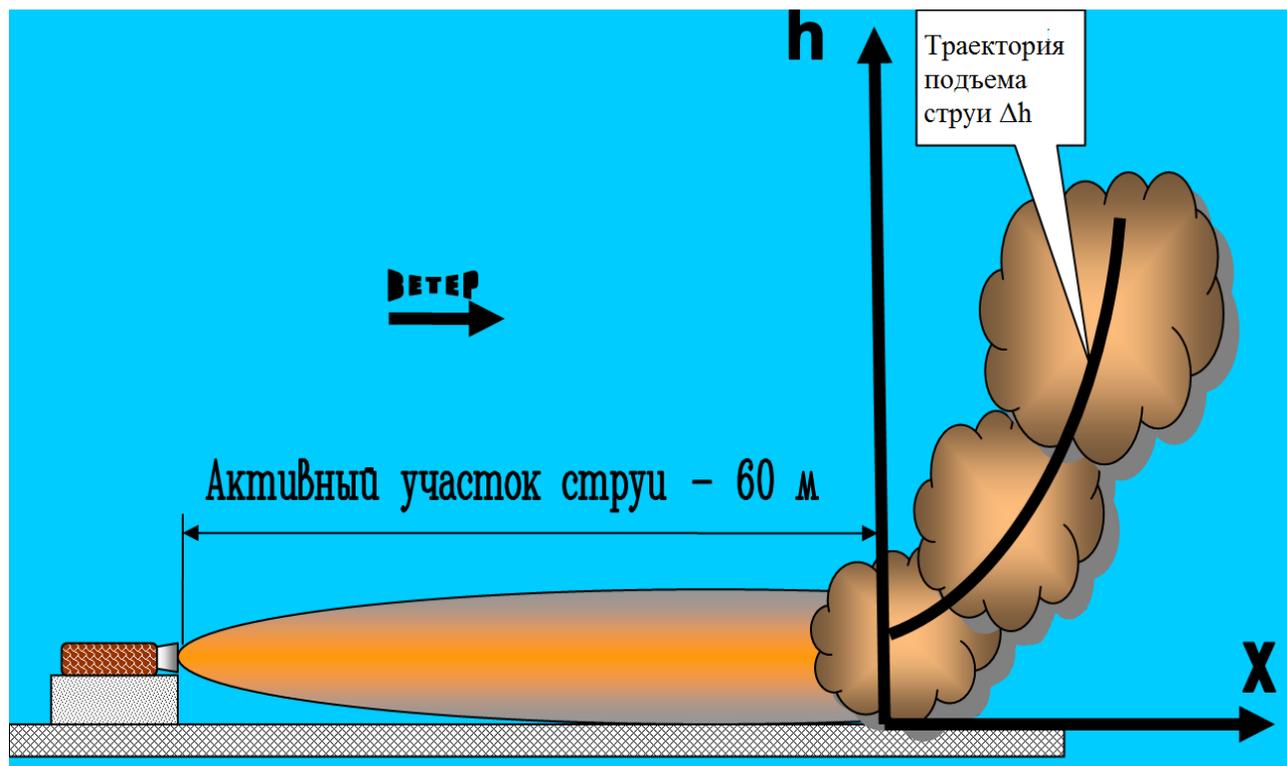


Рис. 1. Траектория подъема струи

Район предприятия ПМЗ относится к умеренному климатическому поясу.

Установлено, что в районе расположения предприятия доминирующими являются условия, соответствующие категориям устойчивости атмосферы С, D, E, F (наиболее неблагоприятные для рассеивания загрязнений) [4]. Дальнейшие расчетные оценки проведены для указанных условий.

Интенсивность переноса и рассеивания выбросов зависит как от погодных факторов, так и от температуры, направления и скорости истечения выбрасываемых газов. Перегрев по отношению к окружающему воздуху выбрасываемых газов вызывает подъем облака Δh над точкой выброса.

Подъем облака выброса происходит постепенно с образованием траектории до некоторой предельной высоты, как показано на рис. 1.

Траектория подъема струи Δh для всех пригодных условий вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta h = \frac{2}{u} \Phi^{1/3} x^{2/3},$$

где x – расстояние от точки выброса до точки детектирования, м;

u – скорость истечения выброса, м/с;

Φ – величина, пропорциональная потоку сил плавучести, которая рассчитывается по формуле

$$\Phi \approx 1,04 \cdot 10^{-5} Q_k,$$

где Q_k – тепловая мощность источника выброса, которая рассчитывается по характеристикам струи продуктов сгорания, Дж/с.

Для определения максимальной высоты подъема струи Δh_{\max} используют следующие формулы [4]:

– для нейтральных условий

$$\Delta h_{\max} = 400 \frac{\Phi}{u^3};$$

– для устойчивых условий при ветреной погоде

$$\Delta h_{\max} = 2,6 \left(\frac{\Phi}{us} \right)^{1/3};$$

– для устойчивых условий при штиле

$$\Delta h_{\max} = 5,1 \Phi^{1/4} s^{-3/8},$$

где u – скорость ветра на высоте выброса, м/с;

s – параметр устойчивости атмосферы;

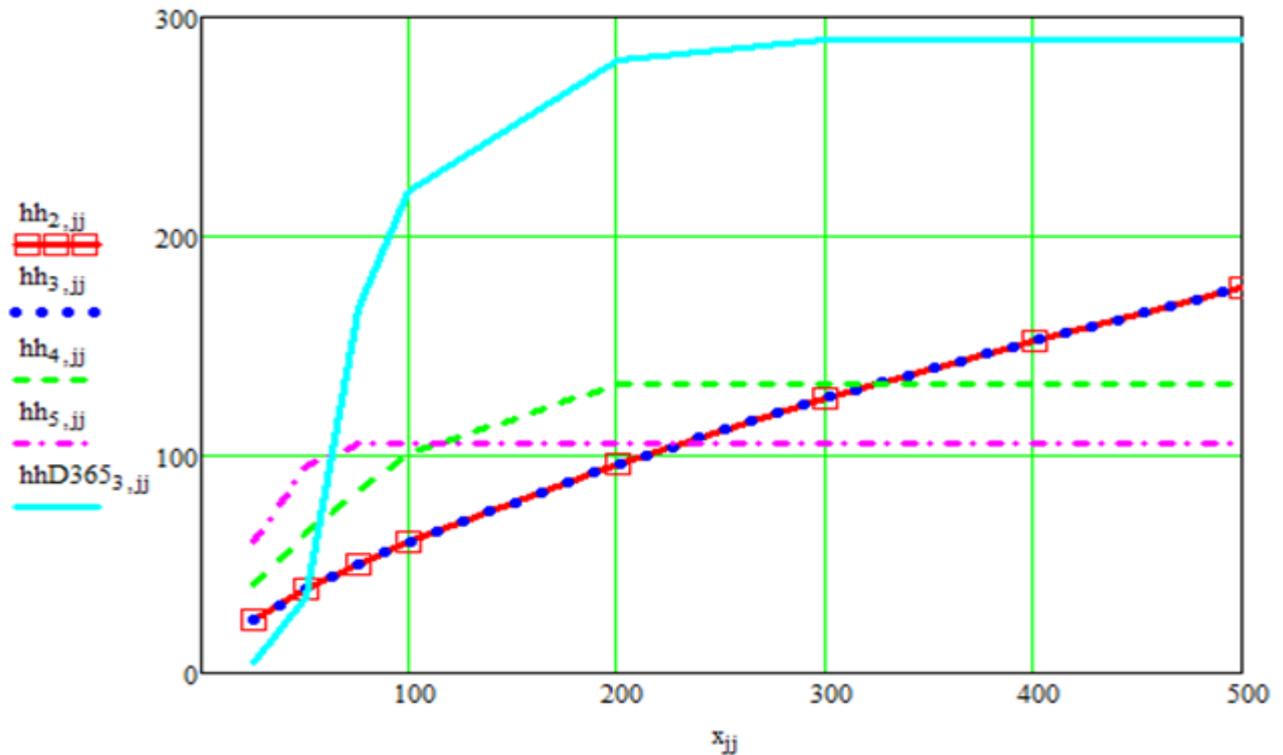


Рис. 2. Траектория подъема струи для категорий устойчивости атмосферы C, D, E, F и при испытаниях двигателя Д365:

- hh₂ – траектория подъема облака при категории устойчивости атмосферы C;
- hh₃ – траектория подъема облака при категории устойчивости атмосферы D;
- hh₄ – траектория подъема облака при категории устойчивости атмосферы E;
- hh₅ – траектория подъема облака при категории устойчивости атмосферы F;
- hhD365 – траектория подъема облака при испытаниях Д365

Для различных категорий устойчивости атмосферы

$$s = \begin{cases} 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ для категории E} \\ 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ для категории F} \\ 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ для категории G} \end{cases}.$$

Категория G в рамках данной расчетной модели не рассматривается.

Результаты расчетов траекторий подъема струи для категорий устойчивости атмосферы C, D, E, F, а также траектория, зафиксированная при испытаниях двигателя Д365, приведены на рис. 2.

Расчетная модель

Расчет максимальных приземных концентраций хлористого водорода выполнялся в рамках модели Гаусса кратковременного источника по формуле (6) [4]

$$C(x, y, z) = \frac{10^6 q F(x)}{\pi \sigma_x \sigma_y u} \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_x^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_x^2}\right] \right\},$$

где x, y, z – эйлеровы координаты точки в пространстве;

$C(x, y, z)$ – концентрация, мг/м³;

q – выброс паров соляной кислоты, кг/с;

$q_{HCl} = 13,028$ кг/с;

u – скорость ветра, м/с;

h – высота облака выброса над землей на расстоянии x от выброса, м;

$F(x)$ – функция истощения облака [4].

Результаты расчетов

Расчеты проводились с использованием системы компьютерной математики MathCad.

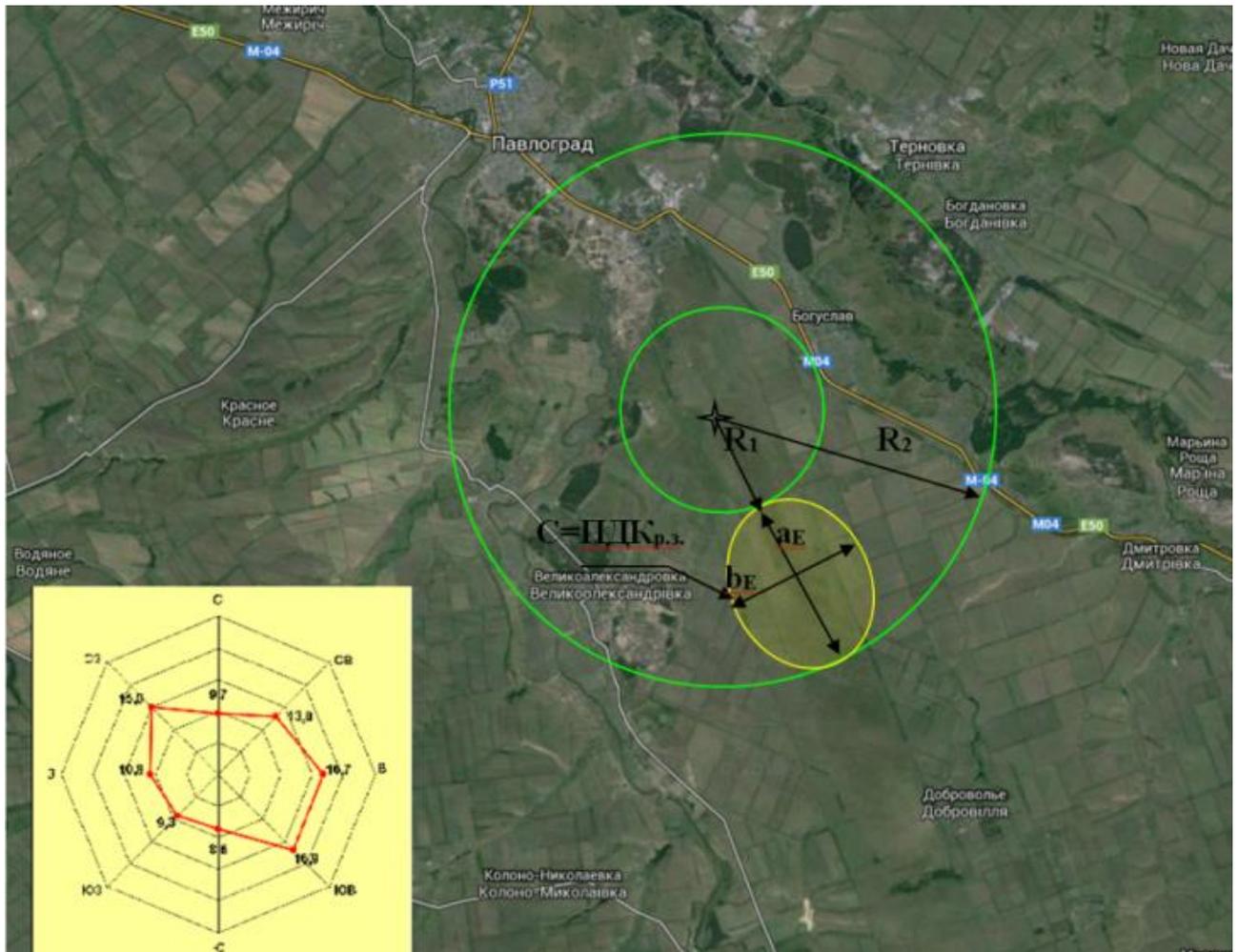


Рис. 3. Карта рассеивания паров HCl при категории устойчивости атмосферы E:
 a_E – длина зоны (в направлении ветра) сверхнормативного загрязнения воздуха парами HCl до $1,7 \text{ ПДК}_{p,z}$;
 b_E – ширина зоны сверхнормативного загрязнения воздуха парами HCl до $1,7 \text{ ПДК}_{p,z}$

Результаты расчетов изменения концентраций паров хлористого водорода с возрастанием расстояния от стенда представлены на рис. 3, 4.

Выбросы аэрозоля окиси алюминия приводят к кратковременному (от 5 до 30 мин) сверхнормативному загрязнению воздуха до уровня 20 ПДК на расстояниях до 350 м от стапеля. Примерно 98% выбрасываемого аэрозоля окиси алюминия будет оседать на почву. Наиболее мелкие фракции, составляющие около 2 % по массе, всплывают со струей и в процессе атмосферной диффузии рассеиваются без образования концентраций, превышающих предельно допустимые. Отходы алюминия входят в так называемый Зеленый перечень отходов и опасности не представляют.

В соответствии с предложениями по реализации мероприятий по защите атмосферы при испытаниях двигателя ДЗ65 на

стенде ПМЗ 29 ноября 1990 г. был проведен эксперимент, во время которого осуществлялись наблюдения за динамикой образования и всплытия облака продуктов сгорания и проводился контроль загрязнения окружающей среды на прилегающих к стенду территориях [5, 6].

Сравнение результатов указанного эксперимента и приведенных выше расчетов позволяет сделать вывод о корректности примененной математической модели.

Оценка шумового воздействия на окружающую среду

Запуск МТДУ сопровождается акустическим воздействием на окружающую среду и обслуживающий персонал. При этом основным источником шума является высокоскоростная газовая струя. Уровень звукового давления в расчетной точке на расстоянии R (рис. 5) от источника шума рассчитывается по формуле [1]

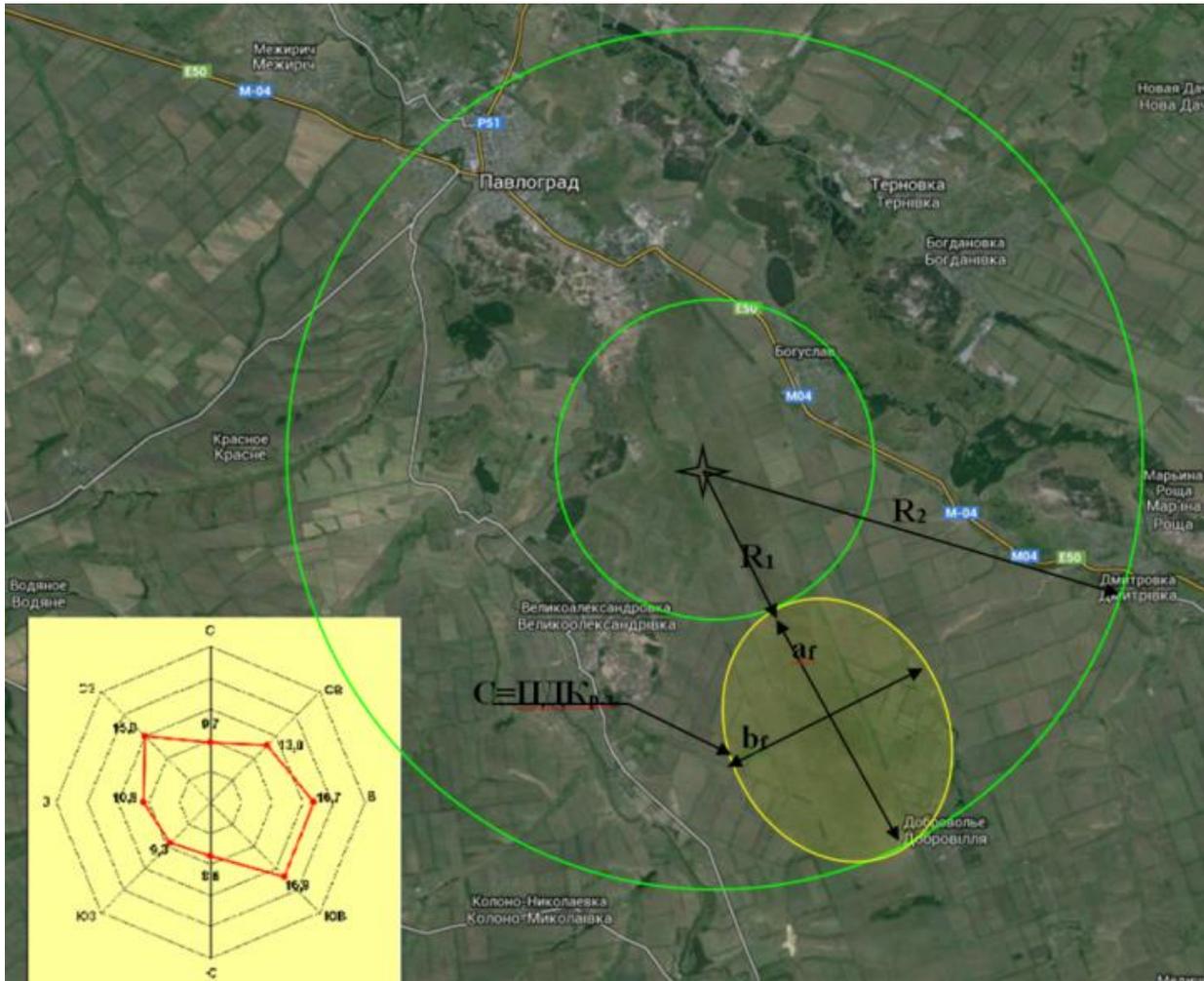


Рис. 4. Карта рассеивания паров HCl при категории устойчивости атмосферы F:

a_f – длина зоны (в направлении ветра сверхнормативного загрязнения воздуха парами HCl до 1,4 ПДК_{р,3};

b_f – ширина зоны сверхнормативного загрязнения воздуха парами HCl до 1,4 ПДК_{р,3}

$$L_p = L_o + 10 \lg F - 10 \lg \lambda - 20 \lg l - \frac{\beta_o l}{1000} + \Delta L_{OTP} - \Delta L_C,$$

где L_o – эквивалентный уровень звуковой мощности источника шума;

F – фактор направленности источника шума для направления на расчетную точку (для ненаправленного источника шума $F=1$);

λ – пространственный угол (в стерadians), в который излучается шум (для излучения шума в пространство $\lambda = 4\pi$);

l – расстояние от акустического центра источника шума до расчетной точки;

β_o – коэффициент поглощения звука в воздухе;

ΔL_{OTP} – повышение уровня звукового давления вследствие отражения звука от

больших поверхностей, расположенных на расстоянии от расчетной точки, не превышающем $0,1R$;

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

Уровень шума струи (при числах $M > 2$) определяется по формуле

$$L_o = 30 \lg U_c + 10 \lg S + 20 \lg \rho_c + L_{pc},$$

где U_c – скорость истечения струи, м/с;

S – площадь среза сопла, м²;

ρ_c – плотность основной струи, кг/м³;

$L_{pc} = 100$ дБ для струй реактивных двигателей.

Исходные данные, использованные для акустического расчета, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для акустического расчета

L						L_o		
F	λ	R , км	β_o	$\Delta L_{отр}$	ΔL_c	U_c , м/с	S , м ²	ρ_c , кг/м ³
1	4π	От 0,1 до 0,5	5,2	0	0	2593	0,149	0,1696

Эквивалентный уровень звуковой мощности струи МТДУ, рассчитанный по формуле, составляет 178,7 дБА.

Результаты расчета уровня звукового давления, создаваемого при стендовых испытаниях МТДУ в точках, удаленных на различные расстояния R от стенда, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Уровни звукового давления при стендовых испытаниях МТДУ

Расстояние до расчетной точки, м	Уровень звукового давления в расчетной точке, дБА
25	139,7
50	133,5
75	129,9
100	127,2
125	125,2
150	123,4

МТДУ является источником непостоянного импульсного шума. Допустимым значением уровня звука для такого источника является значение 125 дБА. Анализ результатов расчетов показывает, что уровень акустического воздействия в процессе стендовых испытаний МТДУ на окружающую среду не превышает установленных требований, за исключением зоны радиусом до 150 м, непосредственно примыкающей к сооружению стенда (зона отчуждения составляет 1-1,5 км).

Тепловое воздействие струи продуктов сгорания при работе МТДУ

Запуск МТДУ сопровождается воздействием высокотемпературной газовой струи на окружающую среду.

Расчет теплового воздействия струи продуктов сгорания при работе МТДУ проведен в расчетном модуле «Факел» программного комплекса «РизЭкс-2».

Модуль предназначен для определения тепловых нагрузок, возникающих при горении струи газов или паров, и последствий теплового воздействия. Результатом моделирования являются поля тепловых нагрузок, зоны ожогов различной степени тяжести в результате воздействия теплового излучения.

В табл. 6 приведены результаты расчета возможного теплового воздействия струи продуктов сгорания.

Таблица 6

Воздействие на людей

Степень воздействия	Максимальный тепловой поток, кВт/м ²	Максимальное расстояние от струи, м
Ожог III степени	345,11	59,5
Ожог II степени	224,83	63,5
Ожог I степени	126,00	68,5
Болевой порог	1,40	75,5

Продолжительность теплового воздействия не превышает 42 с. В связи с тем, что стенд расположен на открытой бетонированной площадке, исключается возникновение пожаро- и взрывоопасных ситуаций, и тепловое излучение не наносит вреда почве и растительности. Уровень теплового воздействия на окружающую среду находится в пределах нормы.

Характеристики зон сверхнормативного загрязнения приземного слоя воздуха представлены в табл. 7.

Таблица 7

Характеристики зон кратковременного загрязнения приземного слоя атмосферы

Категория устойчивости атмосферы	F	E	C, D
Начало зоны R ₁ , км, от стенда	8	4	Сверхнормативное загрязнение отсутствует
Конец зоны R ₂ , км, от стенда	14,8	11,5	
Протяженность, км	6,8	7,5	
Максимальная ширина b, км	0,68	0,68	
Максимальная концентрация, доли ПДК _{р.з}	1,4	1,7	

Указанное в табл. 7 загрязнение 1,4 – 1,7 ПДК_{р.з} опасности для людей и окружающей среды не представляет. Среднесуточные показатели останутся в пределах нормы.

Населенные пункты, которые могут попасть в зону загрязнения, приведены в табл. 1.

При огневых стендовых испытаниях примерно 98% выбрасываемого аэрозоля окиси алюминия будет оседать на рельеф на расстояниях до 350 м от стапеля.

При испытаниях МТДУ возможно кратковременное превышение уровня акустического воздействия на окружающую среду на расстояниях до 150 м от стенда (зона отчуждения составляет 1-1,5 км). Сверхнормативное акустическое воздействие на объекты жилой зоны при стендовых испытаниях МТДУ исключается.

Выводы

Учитывая ограниченное число испытаний (одно-два испытания в месяц), относительно малый выброс вредных веществ из МТДУ, результаты расчетных оценок и ранее выполненных исследований, экологическая безопасность при проведении на стенде Павлоградского механического завода серии стендовых испытаний перспективных МТДУ обеспечивается.

Список использованной литературы

1. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под ред. Е. Я. Юдина. – М.: Машиностроение, 1985.
2. Предельно допустимые концентрации и ориентировочные безопасные уровни воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – Донецк: УкрНТЭК, 2000.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны// Сб. ГОСТов. – М.: ИПК "Изд-во стандартов", 1988.
4. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. Исследование загрязнения окружающей среды при испытаниях изделия типа 365 на площадке ПМЗ: Отчет о НИР/МПО "Технохим", НПО ГИПХ. – Ленинград, 1991.
6. Оценка гигиенической ситуации в районе Павлоградского механического завода при испытании изделий 15Д365: Отчет по договору № 48-6/91-429 ЮР-1/Министерство здравоохранения СССР. Ордена Ленина институт биофизики. – Москва, 1991.

Статья поступила 05.07.2016