

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домаренко В.А., Молчанов В.И., Тепляков И.М. Геотехнологические методы разработки железорудных месторождений Западно-Сибирского бассейна // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. — 2001. — Вып. 2. — С. 169–175.
2. Арнс В.Ж., Исмаилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. — М.: Недра, 1980. — 229 с.
3. Арнс В.Ж. и др. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. — М.: Горная книга, 2007. — 295 с.
4. Копысов С.Г. Параметры экологически допустимой разработки Бакчарского железорудного месторождения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. — 2011. — № 5. — С. 420–425.
5. Петин А.Н. Рациональное недропользование в железорудной провинции Курской магнитной аномалии (Проблемы и пути их решения): автореф. дис. ... д-ра географ. наук. — Астрахань, 2010. — 47 с.
6. Алексеев В.А. Экологическая геохимия. — М.: Логос, 2000. — 626 с.
7. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. — 230 с.
8. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1975. — 341 с.
9. Сает Ю.Е., Янин Е.Л. и др. Геохимия окружающей среды. — М.: Недра, 1990. — 335 с.
10. Горлова О.Е. Техногенные месторождения полезных ископаемых. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2001. — 77 с.
11. Кустрь Л.А., Янценко А.П. Опыт проведения рекультивационных работ при разработке Тарского циркон-ильменитового месторождения методом СГД // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы V Междунар. научно-практ. конф. — М.: Изд-во РУДН, 2006. — С. 62–67.

Поступила 16.03.2012 г.

УДК 662.2:658.567.5:502.175

СИТУАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЗАРЯДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОТКРЫТОМ СТЕНДЕ

М.В. Попова, А.В. Литвинов, С.Н. Козлов*, В.П. Лушев

ОАО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск

*Бийский технологический институт (филиал АлтГТУ им. И.И. Ползунова), г. Бийск

E-mail: popova.maria.v@gmail.com

Рассмотрены факторы, определяющие экологическую безопасность открытого стенда при сжигании твердотопливных зарядов энергетических установок с использованием водной экологической защиты. Предложена схема структурной формализации информационно-управляющей системы обеспечения и контроля уровня выбросов продуктов сгорания в атмосферу. Определена функция экологического риска с учетом отказов информационно-управляющей системы. Даны исходные формулировки функциональных и параметрических отказов системы обеспечения экологической безопасности. Рассмотрены особенности термодинамического состояния выброса продуктов сгорания в атмосферу.

Ключевые слова:

Экологическая безопасность, экологический риск, статическое сжигание, твердотопливные заряды энергетических установок, водное орошение струи, баланс масс, системный подход, управляющая система.

Key words:

Environmental safety, ecological risk, static firings, solid-propellant propulsion system, water spraying jet, mass balance, systems approach, management system.

Сжигания на открытом стенде с применением водной экологической защиты (ВЭЗ) используются как один из способов огневой ликвидации (или утилизации) твердотопливных зарядов крупногабаритных энергетических установок (ЭУ) различного назначения [1, 2].

В литературе [3] вопросы экологической безопасности рассмотрены применительно к «сухим» сжиганиям твердотопливных зарядов, когда выбросы продуктов сгорания (ПС) в атмосферу подконтрольны, но не регулируемы. Использование ВЭЗ позволяет не только снизить выбросы в атмосферу, но и регулировать их величину. Цель настоящей статьи — формализовать структуру обеспечения экологической безопасности при исполь-

зовании ВЭЗ в рамках информационно-управляющей системы и определить экологические риски при отказах этой системы.

В процессе сжигания ПС твердого топлива содержащиеся вредные для окружающей среды компоненты (ВК), такие как хлористый водород, оксид алюминия и др., выбрасываются в атмосферу (рис. 1) и рассеиваются по мере подъема облака ПС. Затем часть ВК в составе аэрозолей осажается на земную поверхность.

Стенд, на котором проводятся сжигания, является кратковременным точечным источником залпового выброса ПС в атмосферу со следующими характеристиками: длительность выброса 200...300 с, масса 15...60 т, начальная температура



Рис. 1. Характерный вид выброса ПС

облака от 60 до 200 °С, высота подъема облака 800...1200 м, время живучести облака до полного рассеивания 30...40 мин.

Критерием экологической безопасности стенда при сжигании является непревышение концентрации ВК c_i нормативных предельно-допустимых концентраций в приземном слое атмосферы на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), т. е.

$$c_i < [c_i], \quad (*)$$

где $[c_i]$ — предельнодопустимая концентрация по i -му ВК.

Обеспечение этого условия является целевой функцией системы экологической безопасности стенда [4].

Экологический риск рассматривается как вероятность нарушения условия (*):

$$R = \text{Вер}(c_i > [c_i]).$$

При отсутствии активных средств экологической защиты система экологической безопасности содержит два элемента:

- 1) перед проведением сжигания — расчетно-теоретический прогноз выполнения условий безопасности (*) с учетом параметров ЭУ и метеобстановки (ветер, облачность, осадки) и принятие решения о проведении или не проведении сжигания;
- 2) после проведения сжигания — приборно-инструментальный контроль концентраций ВК c_i на границе санитарно-защитной зоны.

Назначение ВЭЗ состоит в том, чтобы за счет орошения струи ПС водой осадить большую часть ВК в рабочей зоне стенда [5].

Ввод воды в струю ПС осуществляется через кольцевые коллекторы, расположенные вдоль струи ПС (рис. 2). В этом случае концентрация

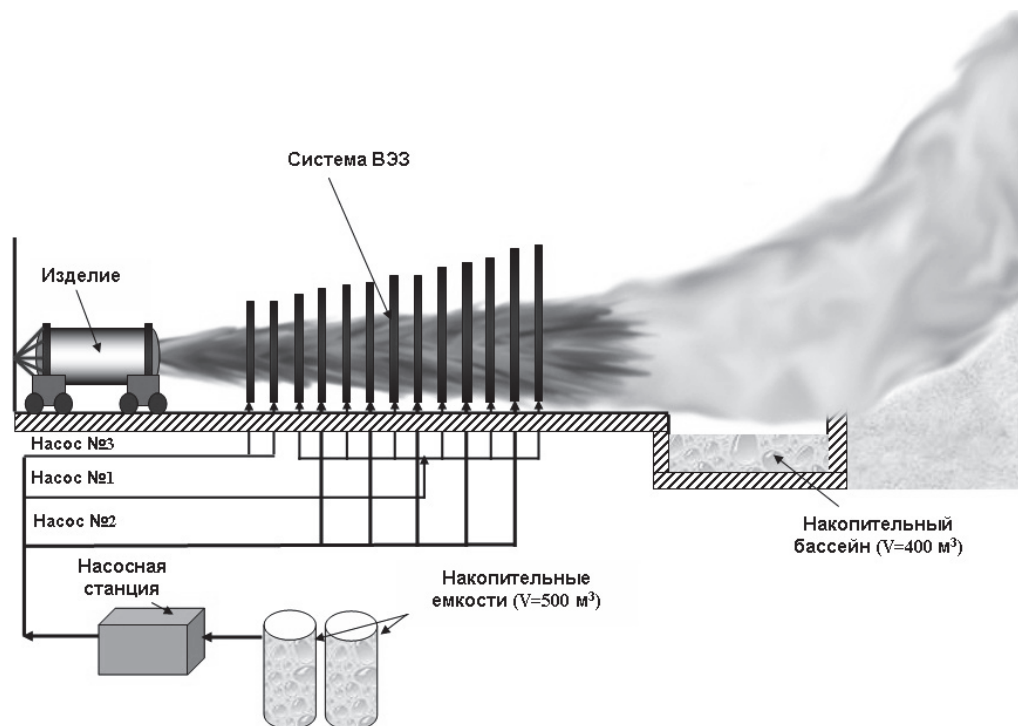


Рис. 2. Система ВЭЗ

ВК в облаке ПС c_i зависит главным образом от расходной характеристики ВЭЗ $G_b(x,t)=var$, где G_b – секундный расход воды; x – координаты установки коллекторов; t – текущее время работы ЭУ.

Система формально становится управляемой за счет изменения расходной характеристики $G_b(x,t)=var$ и может быть оптимизирована по общему расходу воды:

$$\int_0^{t_k} G_b(x,t)dt = \min \text{ при } c_i < [c_i].$$

Оптимизация проводится путем компьютерного моделирования системы уравнений для газодинамических процессов струи, орошаемой системой ВЭЗ.

Баланс массы ПС после орошения можно записать следующими соотношениями.

Суммарная начальная масса ПС и воды: $m_{\Sigma} = m_{\text{ПС}}^0 + m_{\text{В}}^0$.

Масса выброса в атмосферу

$$m_{\text{ПС}}^a = m_{\text{ПС}}^0 - m_{\text{ПС}}^{\text{ОС}},$$

$$m_{\text{В}}^a = m_{\text{В}}^0 - m_{\text{ПС}}^{\text{ОС}}.$$

Здесь v – вода; a – выброс в атмосферу; 0 – начальное значение; ОС – осаденная часть ПС.

Для оценки эффективности ВЭЗ интересны следующие коэффициенты:

- орошения струи $k_{\text{ор}} = \frac{m_{\text{В}}^0}{m_{\text{ПС}}^0}$, определяет расход воды, которая является дорогостоящим природным ресурсом и требует экономии;

- осадения ПС в рабочей зоне стенда $k_{\text{ос}} = \frac{m_{\text{ПС}}^{\text{ОС}}}{m_{\text{ПС}}^0}$ по каждому ВК, определяет техническую эффективность ВЭЗ;

- «увлажнения» облака ПС $k_{\text{ув}} = \frac{m_{\text{В}}^a}{m_{\text{ПС}}^a}$, определяет динамику подъема облака.

Каждый из этих показателей зависит от расходной характеристики ВЭЗ $G_b(x,t)$.

Использование ВЭЗ в идеальном случае должно снизить выбросы в атмосферу, что фактически и происходит – по результатам анализа технологических стоков в рабочей зоне стенда осадается $\approx 80\%$ оксида алюминия и 50% хлористого водорода. Однако снижение массы выброса однозначно не гарантирует обеспечение нормативов по концентрациям компонентов ПС в атмосфере вследствие возникновения следующих факторов после орошения водой струи ПС:

- вследствие орошения водой снижается начальная температура облака ПС, что приводит к снижению высоты подъема и должно увеличивать концентрации ПС в зонах рассеивания, но в идеале компенсируется снижением содержания ПС в облаке за счет осадения ВК в рабочей зоне;
- при отсутствии ВЭЗ продукты сгорания твердого топлива содержат $\approx 15...20\%$ воды. Орошение увеличивает содержание воды до $30...40\%$. Вследствие этого облако ПС переходит в неустойчивое термодинамическое состояние, тем-

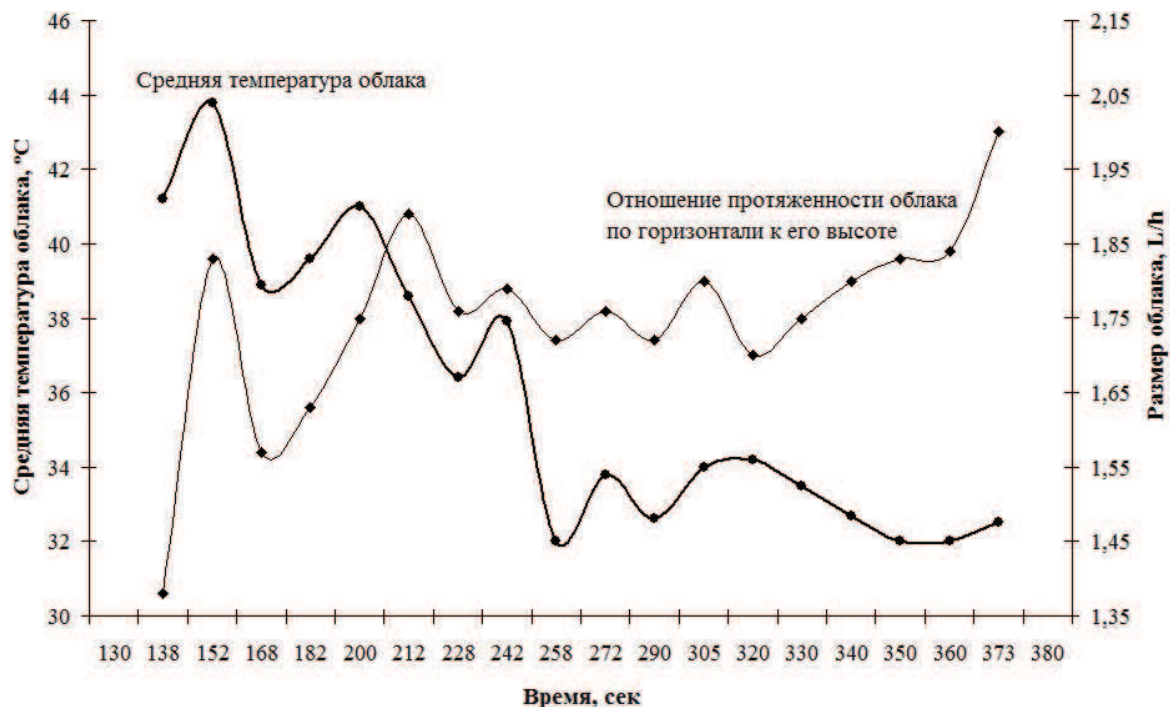


Рис. 3. Результаты замеров температуры и размера облака ПС

пература, размеры и масса его определяются процессами конденсации и коагуляции аэрозольной фазы. Как показывают исследования, эти процессы имеют гармонический, колебательный характер, что, в свою очередь, определяет периодичность процесса выпадения из облака аэрозольных компонентов.

Это видно из рис. 3, где представлены результаты замеров температуры и размера облака ПС по вертикали на одном из участков его подъема.

Вследствие этого существующие физико-математические модели распространения загрязнений в атмосфере [6] непригодны и требуется разработка соответствующей теории с учетом того, что зоны распространения и концентрации вредных веществ в атмосфере обуславливаются остаточной массой $m_{\text{ПС}}^a$ ПС в облаке и содержанием в нем влаги, т. е. $c_i(x,t)=c_i(m_{\text{ПС}}^a, m_{\text{в}}^a)$, в свою очередь, зависит от метеоусловий и расходной характеристики ВЭЗ $G_b(x,t)$.

Введение ВЭЗ позволяет перейти в информационно-управляющей системе «Экология» [7] от дискретных «да/нет» решений к параметрическому, выбирая для заданных условий сжигания и метеообстановки соответствующую функцию расходной характеристики ВЭЗ. В этом случае информационно-управляющая система «Экология» может быть представлена в виде двухзвенной системы управления (рис. 4), в которой элемент «Регулятор» через расходную характеристику $G_b(x,t)$ определяет степень осаждения ПС в рабочей зоне стенда, а элемент «Распределитель» позволяет определить параметры рассеивания ПС в атмосфере с учетом степени орошения струи. Такая схематизация позволяет formalизовать, исследовать и идентифицировать информационно-управляющую систему «Экология» в рамках теории систем с учетом стохастической неопределенности процессов [8].

При этом формулировка экологического риска остается прежней, т. е. это $R=\text{Вер}(c_i>[c_i])$, величина которого определяется отказами системы обеспечения и контроля экологической безопасности стенда, включающей ВЭЗ и методы прогноза экологических последствий перед проведением сжигания. Введем понятия функционального и параметрического отказов системы ЭБ.

Определим функциональные отказы. Это:

- отказ ЭУ – $q_{\phi 1}$ – разрушение и другой вид аномальной работы ЭУ при горении заряда;
- отказы ВЭЗ – $q_{\phi 2}$ – прекращение подачи воды в коллекторы; $q_{\phi 3}$ – разрушение одного или нескольких коллекторов; $q_{\phi 4}$ – нарушение параметров орошения струи (изменение расхода или давления воды).

Параметрические отказы системы – это методические ошибки, включающие:

- q_{n1} – степень неопределенности модели прогноза по функции $c_i=f(G_b(x,t))$, обуславливаемая упрощением физической картины процесса в струе и облаке ПС;
- q_{n2} – ошибки идентификации зависимости $c_i=f(G_b(x,t))$ по экспериментальным данным;
- q_{n3} – ошибки $c_i(x)$ при прогнозе конкретного сжигания при заданной метеообстановке.

Тогда риск – это $R=\text{Вер}(c_i>[c_i])$ при $G_b(x,t) \neq [G_b(x,t)]_{\text{нр}}$ или $R=\text{Вер}(c_i>[c_i])$ при $\Delta G_b \neq 0$, где ΔG_b – отклонение расходной характеристики от требуемой вследствие возникновения (действия) функциональных и (или) параметрических отказов системы экологической безопасности, указанных выше. Тогда $R=1-\sum q_j k_j$, где q_j – вероятность появления j -го вида отказа; k_j – коэффициент влияния отказа j -го вида на максимальную концентрацию c_i i -го ВК ПС; c_i – расчетная величина концентрации ВК.

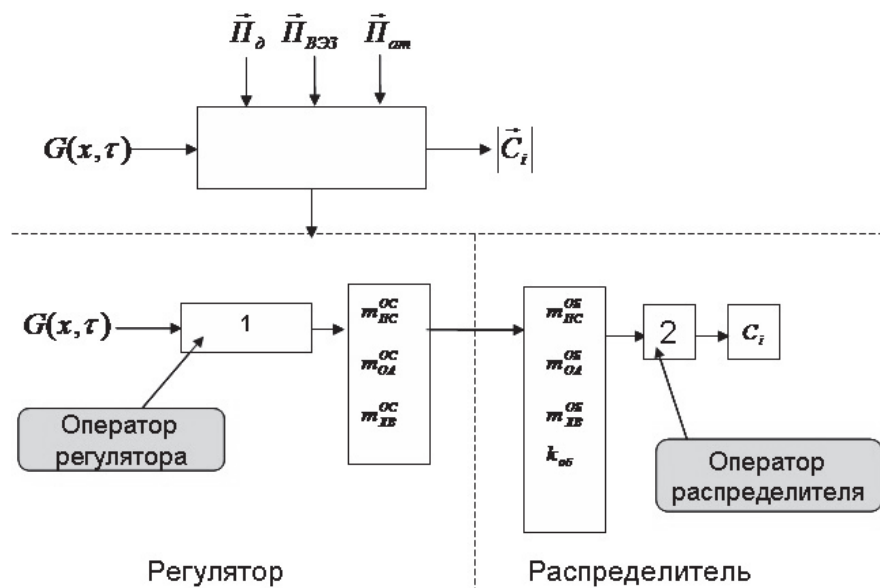


Рис. 4. Структурная схема ИУС «Экология»

Многолетний опыт проведения сжиганий твердотопливных зарядов ЭУ показывает, что вероятность возникновения функциональных отказов мала и составляет $q_{\text{ф1}} < 10^{-4}$, $q_{\text{ф2,3,4}} < 10^{-2}$.

Основным источником риска являются параметрические отказы, обуславливаемые сложностью и многофакторностью физических процессов, протекающих в струе и облаке ПС. Поэтому практически невозможно разработать математически точную модель рассеивания ВК. Предложенная выше формализация информационно-управляющей системы «Экология» позволяет позвенно идентифицировать модель на основе результатов натурных испытаний двигателей, оценить риски по многопараметрической стохастической схеме и снизить уровень параметрических отказов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марьяш В.И., Козлов С.Н. Возможные методы ликвидации смесевых твердых топлив крупногабаритных зарядов маршевых ступеней ракетных комплексов // Проблемы утилизации смесевых твердых топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники: Сб. докл. IV Всеросс. научно-практ. конф. — Бийск, 21–23 сентября 2005. — М.: ЦНИИХМ, 2006. — С. 8–11.
2. Жарков А.С., Марьяш В.И., Жуков А.П., Вагичев С.Н., Коваленко Г.П., Яскин А.В. Безопасность работ при ликвидации РДТТ методом статического сжигания // Высокоэнергетические материалы. Демилитаризация и гражданское применение: Тез. докл. Междунар. конф. «НЕМs-2004». — Белокуриха, 6–9 сентября 2004. — Бийск: ФГУП «ФНПЦ «Алтай», 2004. — С. 82.
3. Технические и экологические аспекты ликвидации твердотопливных межконтинентальных баллистических ракет / под общей ред. член-корр. РАН, д-ра техн. наук, проф. М.И. Соколовского и д-ра мед. наук, проф. Я.И. Вайсмана. — Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. — 636 с.
4. Олейников Б.Д., Марьяш В.И., Жарков А.С., Тихомирова Т.В., Козлов С.Н., Лушев В.П. Экологический мониторинг быстропротекающих процессов сжигания твердотопливных зарядов ракетных двигателей // Проблемы и методология утилизации смесевых твердых топлив, отходов спецпроизводств и остатков

Выводы

1. Разработана схема структурной формализации информационно-управляющей системы обеспечения экологической безопасности открытого стенда при сжигании твердотопливных зарядов энергетических установок, которая позволяет увязать расходную характеристику водно-экологической защиты с величиной экологических рисков и оптимизировать ее по общему расходу воды.
2. Не имеющая аналогов конструкция схемы водной экологической защиты дает возможность проводить огневую утилизацию зарядов твердотопливных зарядов энергетических установок на открытом стенде при минимальных рисках нанесения экологического ущерба территориям, прилегающим к стенду.

жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники. Проектирование, отработка и испытания твердотопливных энергетических установок: Докл. III Всеросс. научно-практ. конф. — Бийск, 25–27 сентября 2003. — Бийск: ФГУП «ФНПЦ «Алтай», 2004. — С. 182–187.

5. Козлов С.Н., Попова М.В., Литвинов А.В., Скворцов А.В. Газодинамические параметры высокотемпературной струи при внешнем орошении ее водой. // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: материалы Всеросс. научно-практ. конф. / под ред. О.Б. Кудряшовой. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. — С. 36–41.
6. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 93 с.
7. Попова М.В., Кудряшова О.Б., Литвинов А.В. Информационная система «Экология» в структуре экологической безопасности открытого стенда при статических сжиганиях крупногабаритных энергетических установок на твердом топливе // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. — 2011. — Вып. 1. — С. 87–89.
8. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 3. — М.: Мир, 1973. — 504 с.

Поступила 12.03.2012 г.