

УДК 622.235

Д-р техн. наук Е.Б. Устименко, д-р техн. наук Л.Н. Шиман

## УТИЛИЗАЦИЯ В УКРАИНЕ СНАРЯЖЕННЫХ ТВЕРДЫМ ТОПЛИВОМ КОРПУСОВ ДВИГАТЕЛЕЙ МБР РС-22 С ИСТЕКШИМИ СРОКАМИ ГАРАНТИЙНОГО ХРАНЕНИЯ

*По результатам тестирования и исследования характеристик твердых ракетных топлив межконтинентальных баллистических ракет РС-22 определен выбор экологически и технически безопасного метода их утилизации, который включает гидромеханическое извлечение твердых ракетных топлив из снаряженных ракетным топливом корпусов двигателей с последующей его переработкой. Разработаны критерии и параметры для безопасного проведения технологических процессов, позволяющих утилизировать снаряженные ракетным топливом корпуса двигателей с запредельными сроками хранения.*

*За результатами тестування та дослідження характеристик твердих ракетних палив міжконтинентальних балістичних ракет РС-22 визначено вибір екологічно й технічно безпечного методу утилізації твердих ракетних палив, який включає гідромеханічне вилучення твердих ракетних палив зі споряджених ракетним паливом корпусів двигунів з подальшим його переробленням. Розроблено критерії та параметри для безпечного проведення технологічних процесів, що дозволяють утилізувати споряджені ракетним паливом корпуси двигунів з твердим ракетним паливом з поза-межними термінами зберігання.*

*Based on the results of tests and researches of SS-24 intercontinental ballistic missile solid propellants, an environmentally and technically safe and sound procedure for solid propellant disposal was selected. This procedure involves water-jet removal of solid propellant from motor cases with subsequent propellant processing. Criteria and parameters for a safe processing procedure, that allow disposal of case-bonded solid-propellant rocket motors with out-of-limit shelf life, were determined.*

Одним из значительных научных и инженерно-технических достижений Советского Союза было создание в 80-е годы прошлого столетия межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) стратегического назначения типа РС-22. Обладая уникальными характеристиками, эта ракета являлась одним из основных сдерживающих факторов времен холодной войны.

Большой вклад в разработку конструкции и изготовление трехступенчатого твердотопливного двигателя МБР РС-22 внесли специалисты КБ "Южное", в разработку рецептур и зарядов твердых ракетных топлив (ТРТ), технологий изготовления ТРТ и снаряженных корпусов двигателей – специалисты НИХТИ, Павлоградского химического завода (ПХЗ) и др.

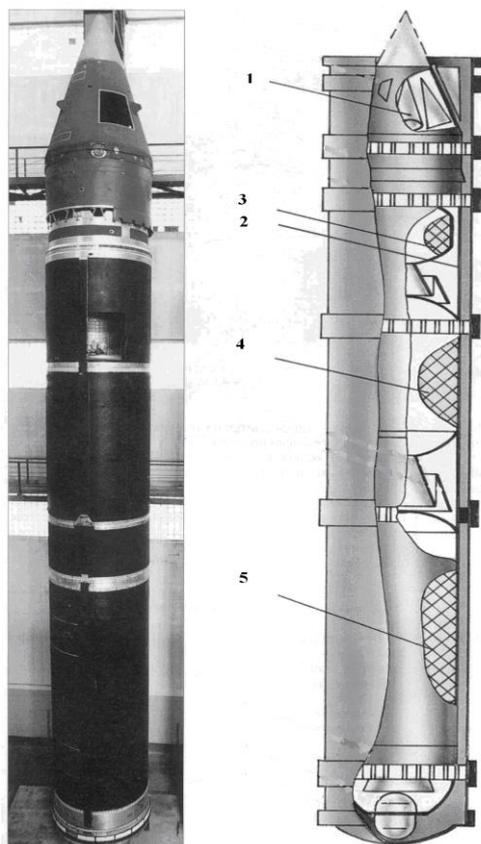
Во времена холодной войны и до начала 90-х годов на территории Украины проходил западный рубеж размещения пусковых установок МБР стратегического назначения, в том числе в составе 43-й Ракетной

армии находилось и 46 единиц МБР РС-22. С распадом Советского Союза Украина приняла статус безъядерного государства с обязательствами в рамках Лиссабонского протокола от 23.05.92 г. (к Договору СНВ-1) о ликвидации всех МБР РС-22 и 8,5 комплектов составных частей РДТТ к этим МБР, которые были размещены на территории Украины. Работы по разборке всех украинских МБР РС-22 и отправка ядерных боеголовок в Россию на переработку были выполнены до конца 90-х гг. Оставшиеся в Украине твердотопливные ракетные двигатели (РДТТ) от этих МБР были разобраны к 2002 г. на комплекты снаряженных ракетным топливом корпусов двигателей (СКД), которые разместили в хранилищах ПХЗ для последующей утилизации.

Конструктивно РДТТ МБР РС-22 представляет собой интегральный трехступенчатый ракетный двигатель, корпуса которого снаряжены различными видами высоко-

энергетического, высокоимпульсного твердого ракетного топлива (рисунок).

При этом СКД I ступени снаряжался ТРТ массой порядка 48 т, а СКД II и III ступеней – ТРТ соответственно до 29 и 13 т. Таким образом, по условиям международных соглашений в Украине необходимо было утилизировать почти 5000 т ТРТ.



Конструкция МБР РС-22:

- 1 – боевая часть с головками самонаведения;
- 2 – пусковой контейнер; 3 – СКД III ступени;
- 4 – СКД II ступени; 5 – СКД I ступени

Для решения проблемы утилизации РДТТ и ТРТ украинских МБР РС-22 американской стороной в соответствии с Рамочным договором от 25.10.93 г. об оказании помощи Украине было предложено разобрать РДТТ до состояния СКД, а затем использовать один из следующих четырех методов их утилизации или ликвидации, а именно:

1. Метод механической обработки и извлечения ТРТ из СКД – проект компаний

Global Environmental Solutions (GES) и United Technology SD (UTech).

2. Метод криогенного разрушения и извлечения ТРТ из СКД с последующей переработкой его в коммерческие взрывчатые вещества (ВВ) – проект компании General Atomics (GA).

3. Метод гидродинамического извлечения ТРТ из СКД с последующей утилизацией измельченного ракетного топлива в коммерческих ВВ – проект корпорации Thiokol.

4. Метод сжигания ТРТ в СКД – проект компании Lockheed Martin Environmental (Lockheed).

Украинской стороне необходимо было определиться с методом утилизации ТРТ с учетом требований к технической и экологической безопасности, а также с учетом экономической целесообразности.

Для этого специалистами ПХЗ и КБ "Южное" совместно в 1998 г. были выполнены исследования и тестовые процедуры с ТРТ четырех видов, которыми снаряжены двигатели МБР РС-22 [1]. Определены характеристики ТРТ в условиях их граничных гарантийных сроков относительно чувствительности к механическим и электростатическим воздействиям, устойчивости к ударно-волновому (САР- и GАР-тест) и тепловому воздействиям (ДТА-тест). Определены параметры горения ТРТ при пониженных давлениях и в условиях нарастания давления (DDT-тест), физико-механические свойства ТРТ и его степень стабильности в различных химических средах. Следует отметить, что такие исследования были проведены впервые с образцами ТРТ, которые извлекались из СКД МБР РС-22.

Результаты, представленные в табл. 1, в частности, показали, что благодаря наличию в рецептурах ТРТ высокочувствительных компонентов с положительной энтальпией такое ТРТ обладает достаточно высокой чувствительностью к механическим воздействиям: для ТРТ СКД I ступени с энергией менее 12,5 Дж, для ТРТ СКД II ступени – 8,5 Дж и менее 2 Дж для ТРТ СКД III ступени. Таким образом, обращаться с таким ТРТ при перевозках, обработке,

хранении необходимо как со взрывчатым веществом подкласса 1.1. При этом сохранение сплошности в структуре ТРТ обеспечивает устойчивость его к ударно-волновым и тепловым воздействиям. Результаты физико-механических испытаний показали, что с истечением гарантийных сроков хранения ТРТ произошло ухудшение прочностных и эластических свойств, особенно для ТРТ СКД III ступени, параметры которых находятся на нижних предельных значениях. По всей видимости, это связано с протеканием процессов деструкции и "старения" полимеров связующего ТРТ со временем. Представленные в табл. 1 значения коэффициента прочности и эластичности определены как отношение значения полученного параметра при тестировании к его предельному значению по требованиям научно-технической документации.

Таблица 1

Некоторые характеристики ТРТ для граничных гарантийных сроков

№ п/п	Исследования и тесты	Результаты для ТРТ		
		I ступени	II ступени	III ступени
1	Чувствительность к удару, Дж	12,5	8,5	2,0
2	Чувствительность к трению, Н	72	60	24
3	САР-тест	Отриц.	Отриц.	Отриц.
4	ГАР-тест	Отриц.	Отриц.	Отриц.
5	ДТА-тест, °С	250	180	165
6	DDT-тест	Отриц.	Отриц.	Полож.
7	Коэффициент прочности	1,5	1,3	1,05
8	Коэффициент эластичности	1,8	1,2	0,9
9	Устойчивость в водной соляной среде с pH < 5,0	Да	Да	Да
10	Устойчивость в водной соляной среде с pH > 8,0	Нет	Нет	Нет

На последующих этапах исследования характеристик ТРТ МБР РС-22 были выполнены тесты на чувствительность ТРТ к воздействию высокоскоростной струи воды (тест Дерринджера), а также проведена

оценка экологического воздействия продуктов сгорания ТРТ на окружающую среду.

Результаты тестирования показали, что при воздействии на ТРТ струей воды, имеющей скорость 2–3 км/с и расчетный уровень ударного давления соответственно 1500–2500 МПа, не происходит воспламенения или детонации образцов ТРТ, извлеченных из СКД I и II ступеней. Для ТРТ СКД III ступени при ударном давлении водяной струи на уровне 2200–2300 МПа происходит инициирование процесса воспламенения. Таким образом, при использовании гидромониторных установок с давлением в струе воды до 100 МПа обеспечивается более чем 20-кратный запас по безопасности воздействия струи воды.

Экологическая оценка воздействия продуктов сгорания ТРТ на окружающую среду была выполнена на основе данных термохимических и термодинамических расчетов по количеству продуктов сгорания ТРТ и с учетом зон их рассеяния в атмосфере. Полученные данные показали, что при открытом сжигании ТРТ только от одного СКД I ступени в атмосферу будет выброшено более 39000 кг или 28,8 млн. л токсичных продуктов, таких как окислы азота и углерода, хлористый водород, сажистые и гетероциклические вещества. При этом расчетный радиус зоны влияния выброса таких веществ составляет до 90 км, и в этой зоне находятся населенные пункты, промышленные центры или трансграничные территории.

Полученные в ходе исследований и тестирования данные позволили определить с выбором метода утилизации СКД с ТРТ МБР РС-22 в Украине. Метод сжигания определен как неприемлемый в связи с загрязнением окружающей среды и территории на большой площади. Кроме того, при сжигании ТРТ в СКД с истекшими гарантийными сроками велика вероятность взрыва и детонации заряда ТРТ вследствие ухудшения сплошности структуры ТРТ и адгезионных слоев теплозащитного покрытия. При взрыве большой массы ТРТ в СКД возникают факторы воздействия от ударных волн, разлета осколков, сеймики, что

ведет к разрушению технологической инфраструктуры и усугубляет воздействие на окружающую среду. Из-за высокой степени влияния на окружающую среду и того, что территория Украины достаточно плотно заселена и на ней нет свободных территорий, метод сжигания ТРТ в СКД был отвергнут как неприемлемый для Украины.

Методы криогенного разрушения и механической обработки также были отвергнуты как неприемлемые из-за необходимости предварительного сегментирования СКД, что является небезопасным для ТРТ, содержащего высокоэнтальпийные компоненты и обладающего высокой чувствительностью к механическим воздействиям. Эти методы имеют высокую степень вероятности возникновения аварийной ситуации, а также малый опыт апробационных работ.

Наиболее оптимальным методом для утилизации ТРТ МБР РС-22 в Украине является метод гидромеханического извлечения и измельчения ТРТ с последующей переработкой его в эмульсионные ВВ, пригодные для ведения взрывных работ на карьерах и рудниках горнодобывающих предприятий.

Преимуществами этого метода являются:

- отсутствие вредных выбросов в атмосферу и возможность организации замкнутых циклов по водным растворам рабочих жидкостей;

- низкая вероятность инициирования воспламенения ТРТ и соответственно возникновения аварии вследствие флегматизирующего действия водных растворов рабочих жидкостей в зонах гидродинамического и механического воздействий на ТРТ при его вымывании из СКД и переработке;

- значительный (20-кратный) запас по уровню безопасного давления в струе рабочей жидкости, которое не превышает 100 МПа для гидромеханического вымывания ТРТ, обеспечивающего проведение процесса гидрорезки и вымывания слоев и фрагментов ТРТ из СКД;

- приемлемость метода для СКД, в которых ТРТ утратило физико-механические характеристики, а заряд ТРТ и адгезионные

слои потеряли сплошность (такие СКД недопустимо ликвидировать методом сжигания из-за возможного взрыва и детонации ТРТ в СКД);

- получение продуктов гидровывывания и измельчения в виде, приемлемом для последующей стабилизации, переработки в водосодержащие эмульсионные ВВ и соответственно решения задачи возврата ресурсов в экономику.

После выбора в качестве наиболее приемлемого для утилизации в Украине метода гидровывывания ТРТ из СКД с последующей его переработкой необходимо было выполнить этапы тестирования и исследований для определения безопасных параметров и режимов работы технологического оборудования для каждого технологического процесса утилизации ТРТ. Кроме того, учитывая долгосрочный период строительства и подготовки объектов утилизации ТРТ необходимо было провести исследования по изменению свойств ТРТ при моделировании условий его ускоренного старения. Такие исследования проводились по методике ускоренных климатических испытаний (УКИ), разработанной и проведенной специалистами КБ "Южное" и ПХЗ [2]. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что к моменту ввода в эксплуатацию объектов утилизации ТРТ для всех СКД имелись запредельные сроки хранения.

При запредельных сроках хранения СКД (для украинских СКД к 2012 г. уже более 10 лет) топливо в них подвергается физико-химическим изменениям структуры и снижаются параметры стабильности. Изменение структуры, нарушение сплошности топлива, образование продуктов деструкции, способных инициировать автокаталитические и экзотермические процессы, существенно влияют на характеристики ракетных топлив в сторону увеличения опасности работы с РДТТ, СКД и ТРТ. Комплекс физико-химических и теплофизических испытаний образцов ТРТ до и после УКИ позволил определить очередность утилизации СКД в зависимости от состояния стабильности свойств ТРТ. При этом совместным решением главных специалистов ГП "КБ "Южное" и ГП НПО ПХЗ для первоочеред-

ной утилизации были определены все СКД III ступени и те СКД II и I ступеней, в которых ТРТ находилось в наименее стабильном состоянии с характеристиками ниже предельных, установленных в НТД. ТРТ в СКД I ступени отличаются большей стабильностью, поэтому для утилизации они определены в последнюю очередь после ТРТ СКД III и II ступеней.

По результатам исследований и с учетом требований экологической и технической безопасности разработанная технология утилизации ТРТ включает: контроль за состоянием ТРТ и отбор СКД на утилизацию в соответствии с установленной очередностью; гидромеханическое извлечение ТРТ из СКД; измельчение и стабилизацию извлеченного ТРТ; переработку измельченных продуктов ТРТ для получения веществ, пригодных для использования в промышленных ВВ, и коммерческих высокоэнергетических компонентов; использование продуктов переработки ТРТ в технологиях промышленных ВВ в качестве энергетических добавок в эмульсионных ВВ; использование продуктов переработки ТРТ в технологиях средств инициирования и взрывания промышленных ВВ, в композиционных смесях для элементов космической техники.

Учитывая многообразие видов ТРТ, подвергающихся утилизации, и различное их состояние по физико-механическим и энтропийным характеристикам, требуется выполнение предварительной оценки безопасности обращения с ними и соответствия технологических параметров процесса утилизации условиям обеспечения технической и экологической безопасности. Разработанный на ПХЗ критериальный метод обеспечения техногенной и экологической безопасности при проведении всего комплекса технологических процессов утилизации ТРТ реализуется в четыре основных этапа (табл. 2) [3].

На этапе 1 такого критериального подхода выполняются исследования, связанные с оценкой состояния СКД и ТРТ по параметрам чувствительности ТРТ к механическим и тепловым воздействиям, для вы-

работки решения об их допуске к утилизации и подготовке рекомендаций по выбору безопасных технологических параметров процесса утилизации. На этапе 2 для процесса гидромеханического извлечения ТРТ устанавливаются параметры работы технологического оборудования и параметры извлекаемого и измельченного вещества для удовлетворения критериям безопасности процесса. При этом вводятся ограничения по таким параметрам, как давление и температура струи рабочей жидкости, скорость движения соплового блока гидромонитора, размер фрагментов и кусков извлекаемого ТРТ и размер крошки после измельчения ТРТ. Кроме того, выполняется оценка физико-химической стабильности и термической устойчивости крошки ТРТ для использования ее на последующих стадиях переработки.

Для обеспечения безопасности процессов дальнейшей переработки полимерная, наполненная влагой крошка от ТРТ подвергается флегматизации в среде водомасляной эмульсии или водополимерного геля. При этом образуются полуфабрикаты, имеющие реологические и физико-химические свойства, приемлемые для их использования при производстве водосодержащих эмульсионных (ЭВВ) или гелевых (ГВВ) ВВ по традиционным технологиям. Поэтому на этапе 3 для процессов переработки полимерной крошки от извлеченного ТРТ устанавливаются критерии и параметры для флегматизирующих сред. Указанные параметры позволяют обеспечить получение технологически пригодных и безопасных полуфабрикатов для применения в традиционных процессах изготовления патронированных и наливных ЭВВ и ГВВ. При этом технологическими методами необходимо обеспечить получение полуфабрикатов, которые не обладают свойствами вещества класса 1, при содержании крошки продуктов переработки ТРТ менее 50 %.

Это позволяет использовать такие полуфабрикаты для изготовления наливных ЭВВ и

ГВВ с использованием смесительно-зарядных машин (СЗМ) и проводить механизированную зарядку скважин. На этапе 4 для процессов, связанных с применением ВВ, содержащих продукты переработки ТРТ, устанавливаются критерии и параметры, позволяющие безопасно использовать такие ВВ с характеристиками не хуже характери-

стик ВВ, традиционно применяемых на горнодобывающих предприятиях. Кроме энергетических характеристик устанавливаются параметры по газовой вредности продуктов взрыва и условиям безопасного обращения и применения ВВ с продуктами переработки ТРТ.

Таблица 2

Критериальный подход к обеспечению техногенной и экологической безопасности процесса утилизации ТРТ

Этап	Процесс	Некоторые критерии по безопасности	Основные параметры
1	Оценка состояния ТРТ и допуск для утилизации (при ухудшении параметров – выработка индивидуальных решений)	Физико-химическая стабильность  Отсутствие экзотермических реакций	Чувствительность: к удару > 2 Дж; к трению > 80 Н Температура разложения > 140 °С
2	Извлечение ТРТ из РДТТ и измельчение извлеченных кусков и фрагментов ТРТ	Предельное давление струи и свойства вымывающего раствора  Скорость движения соплового блока гидромонитора  Размер фрагментов и кусков извлекаемого ТРТ  Физико-химическая стабильность измельченной крошки ТРТ  Отсутствие экзотермических реакций  Размер крошки ТРТ после измельчения  Исключение сброса технологических вод	Давление в струе <100 МПа Показатель pH < 6,5 Температура 15 – 40 °С Значение скорости движения < 50 мм/об  Масса < 1кг Размер < 600 см <sup>3</sup>  Чувствительность: к удару > 10 Дж; к трению > 120 Н Температура разложения > 140 °С Масса < 1,5 г Размер < 1,0 см <sup>3</sup> Замкнутый цикл с использованием вод в составах ВВ
3	Переработка извлеченного ТРТ	Стабильность крошки ТРТ в среде флегматизирующих водомасляных эмульсий или водополимерных гелей Чувствительность флегматизированных эмульсионных и гелевых полуфабрикатов-смесей с крошкой и продуктами переработки ТРТ Содержание крошки ТРТ в ЭВВ (ГВВ) Плотность ЭВВ и ГВВ	Плотность среды 1,4 – 1,7 г/см <sup>3</sup> Срок хранения > 3 мес. Не относятся к веществам класса 1 при содержании < 50 % крошки  < 20 % < 1,25 г/см <sup>3</sup>
4	Применение промышленных ВВ с продуктами переработки ТРТ	Тропиловый эквивалент ВВ Водоустойчивость ВВ Кислородный баланс ВВ Газовая вредность продуктов взрыва Иницирующий импульс  Безопасность обращения (в том числе для наливных смесей приобретение свойств ВВ (ЭВВ или ГВВ) через 20–30 мин после заряжания в скважине)	$\alpha = 0,8 - 1,1$ Не менее 10 сут КБ = (-0,5) – (-2,0) ГВ = < 20 л/кг Для ВВ подкласс 1.1: чувствительность к КД № 8 стабильно до 12 мес. Для ВВ подкласс 1.5: чувствительность к пром. детонатору с m > 200 г; стабильно > 10 сут; вязкость <1000 Па·с

Основные экологические требования, предъявляемые к процессу утилизации ТРТ, заключаются в том, что процесс утилизации должен быть экологически безопасным в местах расположения объектов хранения и утилизации ТРТ как при длительном хранении СКД, извлечении ТРТ, так и при последующей его переработке. Продукты утилизации и переработки ТРТ не должны наносить вред окружающей среде и накапливаться в количествах, представляющих опасность для персонала, производства и окружающей среды.

Поэтому ЭВВ, содержащие продукты переработки ТРТ, имеют рецептурный состав, сбалансированный, как по кислородному балансу, исключающему образование окислов азота, углерода, сажистых и гетероциклических соединений, и обеспечивающий полную нейтрализацию хлористого водорода. Для таких ЭВВ параметр газовой вредности продуктов взрыва составляет менее 20 л/кг, что в 3–5 раз меньше, чем для других видов традиционных тротилсодержащих промышленных ВВ. Контроль за состоянием окружающей среды в местах взрывания ЭВВ с продуктами переработки ТРТ на карьерах показал отсутствие отрицательного влияния на состояние атмосферного воздуха, грунтовых вод и почвы. С использованием разработанного критериального метода оценки экологической и технической безопасности и установленных режимов технологических процессов в настоящее время успешно проведена утилизация всех 54 единиц СКД III ступени, а также 18 единиц СКД II ступени и 1 единицы СКД I ступени, представлявших наибольшую степень опасности при хранении. Работы по дальнейшей утилизации оставшихся СКД с истекшими сроками гарантийного хранения ТРТ проводятся с учетом соблюдения указанных выше критериальных параметров по безопасности процесса утилизации ТРТ.

### Список использованной литературы

1. Лабораторно-экспериментальные исследования образцов СТРТ для оценки факторов, влияющих на безопасность работ с топливом первой, второй, третьей ступеней МБР SS-24: Итоговый отчет. – Павлоград: ПО ПХЗ, 1998. – 246 с.
2. Пат. 69539 А, МПК 7 G01№17/09, F06B33/04. Спосіб прискорення випробувань полімерних матеріалів та виробів на старіння / М.І. Тутов, А.Л. Кіріченко, І.П. Балицький, А.Є. Трегубенко, Л.М. Шиман, Є.Б. Устименко, Л.І. Підкаменна; Заявник і патентовласник КБ "Південне", ДП НВО ПХЗ. – № 2003076704; Заявл. 16.07.03.
3. Устименко Е.Б. Безопасность процессов утилизации ракетных двигателей твердого топлива / Е.Б. Устименко, Л.Н. Шиман, В.И. Голинько. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2011. – 383 с.

Статья поступила 25.06.2013