

УДК 629.764:614.839.841.1

В.И. Перлик, А.П. Кремена

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»
им. М.К. Янгеля»*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАПРАВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА САМОВОСПЛАМЕНЯЮЩИХСЯ КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА

Запропоновано підхід до підвищення ефективності безпечної експлуатації заправного обладнання ракет-носіїв на самозаймистих компонентах палива, що полягає у використанні високошвидкісного регульованого диспергованого потоку рідини для нейтралізації заправного обладнання та змиву розлиття компонентів палива.

Ключові слова: заправне устаткування, розлиття, компоненти палива, нейтралізація, диспергована рідина.

Предложен подход к повышению эффективности безопасной эксплуатации заправочного оборудования ракет-носителей на самовоспламеняющихся компонентах топлива, заключающийся в использовании высокоскоростного регулируемого диспергированного потока жидкости для нейтрализации заправочного оборудования и смыва проливов компонентов топлива.

Ключевые слова: заправочное оборудование, пролив, компоненты топлива, нейтрализация, диспергированная жидкость.

An approach is proposed to increase safety of the fueling equipment for launch vehicles, which use hypergolic propellants. It suggests using high-speed adjustable dispersed fluid flow to neutralize the fueling equipment and flush out the straits of propellant components.

Keywords: refueling equipment, strait, fuel components, neutralization, dispersed liquid.

Постановка проблеми и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время все более широкое применение находят ракеты-носители (РН) на экологически чистых компонентах топлива (КТ) (например, РН «Антарес», РН «Falcon 9», РН «Ангара» и др.). Однако, с целью вывода на разные орбиты одной РН нескольких космических аппаратов, по-прежнему используются ракеты, на верхних ступенях или в разгонных блоках которых применяются самовоспламеняющиеся компоненты топлива (например, РН «Ариан-5», РН «Ангара 1.1», РН «Зенит 3SLB», проектируемая РН «Циклон 4М»).

В связи с изложенным, проблема обеспечения безопасной эксплуатации заправочного оборудования (ЗО) ракет, использующих самовоспламеняющиеся КТ, по-прежнему остается актуальной [1].

Анализ достижений и публикаций. В процессе создания и отработки ракетных комплексов сложились структура, способы и средства обеспечения безопасной эксплуатации ЗО.

Для безопасной эксплуатации ЗО необходимо обеспечить [2]:

- автоматизацию заправочных операций;
- блокировку операций заправки при выходе температуры, давления и уровня КТ за допустимые пределы;
- проверку работоспособности системы управления заправкой;
- безопасную сборку разъемных соединений и герметизацию ЗО;
- наддув емкостей и продувку коммуникаций ЗО;
- сброс (дренаж) паров КТ;
- нейтрализацию баков, емкостей и коммуникаций ЗО, а также смыв проливов КТ в случае их возникновения;
- защиту электрооборудования от паров КТ;
- электростатическую безопасность ЗО;
- обслуживание систем и агрегатов ЗО и контроль их технического состояния;
- организационные мероприятия (подготовка и допуск к работе персонала, контроль за его работой и выполнением требований техники безопасности).

Постановка задачи и ее решение. Одной из главных задач обеспечения безопасной эксплуатации ЗО является нейтрализация самовоспламеняющихся КТ. Это обусловлено тем, что такие компоненты относятся к 1 и 2 классу опасности (например, несимметричный диметилгидразин – 1 класс опасности, азотный тетраоксид – 2 класс опасности) и являются весьма токсичными [1, 3].

В практике эксплуатации ракетно-космической техники разработан целый ряд способов нейтрализации самовоспламеняющихся КТ [1, 3, 4], классификация которых приведена в табл. 1.

Таблица 1

Нейтрализация самовоспламеняющихся КТ

По виду физико-химических процессов	По агрегатному состоянию нейтрализующих агентов	По химическому составу нейтрализующих агентов
- абсорбционный; - адсорбционный; - биохимический; - вакуумный; - восстановления; - вымораживания; - каталитический; - окисления; - солеобразования; - термический; - ультразвуковой.	- газовый; - жидкостной; - парогазовый.	- кислотный; - озонный; - хлорный; - щелочной.

Ни один из приведенных выше способов нейтрализации не является универсальным. Выбор способа зависит от вида КТ, их количества, фазового состояния, вида нейтрализуемого оборудования и полноты нейтрализации. На практике наибольшее распространение при нейтрализации ракетно-космической техники получили следующие способы:

- жидкостной (промывание водой или растворами на ее основе);
- газовый (обдув газом);
- парогазовый (пропаривание);

Жидкостной способ получил наибольшее распространение, так как с его помощью можно проводить как частичную, так и полную нейтрализацию емкостей и коммуникаций ЗО, а также смыв проливов КТ для их последующей нейтрализации.

В настоящее время для смыва самовоспламеняющихся КТ используют сплошные струи воды или растворы на ее основе [3, 4]. Однако подача воды в виде сплошных струй приводит к разбрызгиванию КТ, значительным утечкам воды из зоны нейтрализации, малоэффективному воздействию струи на емкости и коммуникации ЗО при их нейтрализации [5]. Необходимо отметить, что запас жидкости (воды) на стартовом комплексе (СК) ограничен, поэтому необходимо обеспечить рациональное и эффективное ее использование. Последнее существенно зависит от плотности, геометрических характеристик и структуры потока жидкости, подаваемого в зону нейтрализации (в частности, от степени дисперсности и скорости капель жидкости в потоке).

При решении задачи повышения эффективности нейтрализации баков, емкостей и коммуникаций ЗО, а также смыва проливов КТ, необходимо исходить из следующего:

- повышение эффективности должно проходить без значительных изменений существующих систем и с минимальными затратами материальных ресурсов и времени;

- включаемые в состав существующих систем новые элементы и технологии должны быть согласованы с технологическим процессом подготовки и осуществления пуска РН.

Для эффективного проведения работ по нейтрализации емкостей, коммуникаций ЗО и смыва проливов КТ необходимо обеспечить:

- уменьшение скорости испарения и сорбцию паров КТ;
- экранирование систем ЗО и проливов КТ от тепловых потоков из окружающей среды;
- необходимое ударное воздействие потока нейтрализующей жидкости для смыва проливов КТ и их остатков из емкостей и коммуникаций ЗО.

Комплексным средством решения указанных подзадач, является применение диспергированных (капельных) потоков воды с характеристиками дисперсности и геометрическими параметрами потока, обеспечивающими возможность реализации следующих требований:

- максимального накрытия всей зоны нейтрализации КТ и их эвакуации со стартового комплекса;

- управления дисперсностью капель потока жидкости;
- управления скоростью потока жидкости.

1. Снижение скорости испарения при нейтрализации пролива КТ потоком диспергированной жидкости достигается формированием на поверхности пролива изолирующего слоя из этой жидкости, а также разбавлением, перемешиванием и охлаждением пролива тонущими каплями диспергированной жидкости. Наряду со снижением скорости испарения происходит сорбция пара в паровоздушном слое. Капли диспергированного потока жидкости, опускающиеся к поверхности пролива КТ, взаимодействуют с ним, захлаживая его наиболее прогретый поверхностный слой и разбавляя пролив, что и приводит к снижению скорости испарения и концентрации пара в паровоздушной зоне над проливом. Интенсивность взаимодействия диспергированной жидкости с проливом КТ определяется плотностью капельного потока, диаметром капель и скоростью их встречи с поверхностью пролива.

Оценки показывают, что при интенсивности диспергированного потока жидкости $J \geq 0,2 \div 0,3$ кг/(м²·с) и диаметре капель $d_k = (1 \div 2) 10^{-3}$ м, более 85-90% поверхности пролива будет покрыто изолирующим слоем жидкости толщиной $\Delta \geq (0,005 \div 0,01)$ мм, что обуславливает снижение скорости испарения КТ с его поверхности [6].

Кинетика сорбции паров КТ капельной средой диспергированного потока описывается уравнением [6]:

$$\tau \approx \frac{Z}{\beta_c S_{\sum K}} \cdot \ln \frac{C_0 - \frac{\dot{m}_{исп}}{\beta_c S_{\sum K}}}{C_{доп} - \frac{\dot{m}_{исп}}{\beta_c S_{\sum K}}}, \quad (1)$$

где τ – время сорбции паров КТ, с; Z – высота капельного слоя над поверхностью пролива, м; $S_{\sum K}$ – поверхность капель в слое высотой Z над поверхностью пролива площадью один метр квадратный, м²; $\dot{m}_{исп}$ – скорость испарения КТ, кг/(м²·с); C_0 – начальная концентрация пара КТ в паровоздушном слое на высоте Z над поверхностью пролива, кг/м³; $C_{доп}$ – допустимая концентрация пара в паровоздушном слое на высоте Z , кг/м³; β_c – кинетический коэффициент сорбции [7]:

$$\beta_c = \frac{\dot{m}_{исп} \cdot S_{\sum K}}{2} \cdot (C_0 - C_{доп}), \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (2)$$

2. Экранирование от тепловых потоков из окружающей среды. Газокапельная среда диспергированного потока жидкости ослабляет тепловой поток от источника его излучения («огненного шара», факела горящего пролива

КТ) за счет рассеивания. Зависимость этого ослабления от интенсивности диспергированного потока жидкости имеет вид [8]:

$$q = q_0 \cdot \exp(-\beta Z_9) \quad , \quad (3)$$

где q – тепловой поток, кВт/м²; β – коэффициент ослабления теплового излучения ($\beta \approx 2J$) [8]; Z_9 – протяженность газочапельного слоя, м; J – интенсивность диспергированного потока, кг/(с·м²).

Толщина Z капельного экрана над проливом, позволяющая снизить интенсивность теплового потока излучения q_0 от сторонних источников энергетических импульсов до уровня, при котором не может возникнуть устойчивое воспламенение паровоздушного слоя, составляет [6],

$$Z = \frac{1}{2J} \cdot \ln \frac{kq_0}{14} + H_{np} \sqrt{1 - \frac{C_{НКПВ}}{C_s}} \quad , \quad (4)$$

где k – коэффициент безопасности ($k = 1,5 \div 2$); $C_{НКПВ}$ – концентрация пара в паровоздушном слое, соответствующая нижнему пределу воспламенения (взрываемости), кг/м³ [9, 10].

Как показывают оценки, газочапельный слой протяженностью $15 < Z < 20$ м обеспечивает значительное (больше чем на 1–2 порядка) ослабление теплового излучения при интенсивности диспергированного потока $J = 0,1 \div 0,2$ кг/(с·м²).

Капельная среда является также эффективным средством охлаждения потоков горячих газов. Это объясняется внесением в конвективную составляющую теплообмена между каплями и горячим газом теплоты фазового превращения. Выражение для расчета охлаждения потока газов с температурой T_2 , движущегося в капельной среде протяженностью δ , имеет вид [6]:

$$\Delta T \leq 0,014 \frac{(T_\Gamma - 373)^{1,07}}{C_{p\Gamma} \cdot T_\Gamma^{0,545}} \cdot \frac{\bar{W}_\Gamma^{0,143} \cdot \delta^{1,43}}{d_M^{0,572}} \cdot \frac{J}{\dot{m}_{c\Gamma}} \quad , \quad (5)$$

где T_Γ – температура потока горячих газов, К; $C_{p\Gamma}$ – теплоемкость газа, кДж/(кг·К); \bar{W}_Γ – скорость движения горячего газа относительно капель, м/с; d_M – медианный диаметр капель, м; $\dot{m}_{c\Gamma}$ – расход потока горячих газов, кг/(м²·с).

Отсюда, в частности, следует, что чем выше дисперсность капельной среды, т.е. чем меньше d_M , тем интенсивнее протекает процесс захлаживания потока горячих газов.

3. Ударное воздействие диспергированным потоком жидкости на поверхность, загрязненную проливом КТ, а также на стенки емкостей и коммуникаций ЗО является эффективным способом для удаления образующейся пленки КТ, а также различного осадка и окислов.

Для диспергированного потока жидкости в предположении, что поток монодисперсный и распределение капель по длине потока постоянное, давление на стенку определяется по формуле:

$$P = \frac{6c\nu\rho\dot{Q}td_{СТР}}{\pi d_{СТР}^2 L_{\max}}, \quad (6)$$

где c – скорость звука в воде, м/с; ν – скорость капель, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; \dot{Q} – расход жидкости, м³/с; t – время, с; $d_{СТР}$ – диаметр струи, м; L_{\max} – дальнобойность гидроимпульсной струи.

Как отмечается в [11], для обеспечения ударного воздействия на преграду скорость капель должна быть не менее 72 м/с.

Анализ различных способов диспергирования жидкостей [12], ориентированный на реализацию приведенных ранее требований и повышение безопасности эксплуатации заправочного оборудования СК РН в целом, позволил сделать вывод о целесообразности использования гидроимпульсного диспергирования, представляющего собой комбинацию гидравлического и импульсного способов. При гидроимпульсном диспергировании пульсации давления в потоке жидкости, наиболее существенно влияющие на дисперсность, параметры и характеристики потока, генерируются за счет энергии самого потока при фиксированном питательном напоре.

Соотношения для определения основных параметров и характеристик потока гидроимпульсной струи в зависимости от частоты пульсаций давления имеют вид [12]:

- медианный диаметр капель

$$d_M = 0,4kf \frac{(1-kf)H_n^{0,5}H_u^{0,5} + kf \cdot H_u}{[(1-kf)H_n + kf \cdot H_u]^2} + 0,135 \frac{(1-kf)H_n^{0,5} - kf \cdot H_u^{0,5}}{(1-kf)H_n + kf \cdot H_u}, \text{ м}, \quad (7)$$

где f – частота, Гц; H_n – питательный напор, м; H_u – напор в импульсе, м; k – коэффициент ($k = 0,0025$);

- угол раскрытия гидроимпульсной струи

$$\beta_\phi \approx 1,1\beta_{СТР}, \quad (8)$$

где $\beta_{СТР}$ – угол раскрытия сплошной струи, град;

- дальнобойность гидроимпульсной струи

$$L_{\max} = 0,9L_{\max}^*, \quad (9)$$

где L_{\max}^* – дальнобойность сплошной струи, соответствующая заданным значениям H_n и d_0 м;

- интенсивность подачи потока диспергированной жидкости

$$J = 4 \cdot 10^{-3} \frac{d_0^2 H_n^2}{S_n}, \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}; \quad (10)$$

- начальная скорость диспергированного потока жидкости

$$V_y = \sqrt{2g} \cdot \varphi \left[H_n^{0,5} + \frac{H_u^{0,5} (H_u^{0,5} - H_n^{0,5})}{H_u^{0,5} + \frac{1-\gamma}{\lambda} H_n^{0,5}} \right]. \quad (11)$$

Выводы. В целом результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод, что применение гидроимпульсного диспергирования является наиболее эффективным методом для подавления или уменьшения интенсивности опасных факторов при нейтрализации емкостей и коммуникаций ЗО и проливов КТ.

В рамках реализации предлагаемого пути повышения безопасной эксплуатации заправочного оборудования СК РН, разработаны, изготовлены и испытаны образцы устройств различной размерности для генерирования гидроимпульсных струй, характеризующиеся технологичностью и высокой работоспособностью. Характерной особенностью устройств является их высокая надежность и полная функциональная совместимость со штатным гидравлическим оборудованием существующих систем СК [5, 13, 14].

Библиографические ссылки

1. Колесников С.В. Окисление несимметричного диметилгидразина (гептила) и идентификация продуктов его превращения при проливах / С.В. Колесников. – Новосибирск: Изд. СибАК, 2014. – 110 с.
2. Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования / В.Ф. Хлыбов. – М.: МО РФ, 2003. – 248 с.
3. Химотология ракетных и реактивных топлив [Текст] / Под ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1987. – 380 с.
4. Цуцуран В.И. Военно-технический анализ состояния и перспектив развития ракетных топлив [Текст] / В.И. Цуцуран, Н.В. Петрухин, С.А. Гусев. – М.: МО РФ, 1999. – 332 с.
5. Заволока А.Н. Пожаробезопасность эксплуатации стартовых комплексов ракет-носителей: проблемы и перспективы повышения / А.Н. Заволока, А.П. Кремена, А.В. Нестеров и др. // Техническая механика. – 2009. – №2. – С. 53–61.
6. Кремена А.П. Обеспечение химической и взрывопожарной безопасности проливов компонентов топлива на стартовых комплексах ракет-

носителей / А.П. Кремена, Н.Ф. Свириденко // Техническая механика. – 2014. – №1. – С. 95–104.

7. Ермашкевич В.Н. Гидро- и термодинамика насосных систем энергоустановок на черырехокси азота [Текст] / В.Н. Ермашкевич. – Минск.: Наука и техника, 1987. – 287 с.

8. Иванов Е.Н. Пожарная защита открытых технологических установок. – М.: Химия, 1975. – 200 с.

9. Рябцев Н.И. Природные и искусственные газы [Текст] / Н.И. Рябцев. – М.: Стройиздат, 1967. – 326 с.

10. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. [Текст] / Пер. с англ. К. Бомштейна. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

11. Ковалев В.И. Основные физические параметры процесса соударения струи суспензии с преградой в безножевой размольной установке / В.И. Ковалев, А.А. Ерофеева, Ю.Д. Алашкевич // Химия растительного сырья. – 2009. – №3. – С. 165–168.

12. Бабенко В.С., Манько И.К., Кремена А.П. Диспергирование гидроимпульсной струи // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – №16. – С. 21–34.

13. Перлик В.И. Выбор и расчет основных проектных и конструктивных параметров ствольной системы пожаротушения на стартовом комплексе космической ракеты-носителя / В.И. Перлик, А.П. Кремена // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 1. – С. 65–78.

14. Патент 60373 Україна, МКИ А62С3/00. Пристрій для одержання струменя рідини з керованою дисперсністю крапель / А.П. Кремена, Ю.С. Олексієв, О.О. Нода та ін.; заявник і патентоволодар Нода О.О. (Україна). – 2001031839; заявл. 20.03.01; опубл. 15.10.2003, Бюл. №10.

Поступила в редакцію 10.10.2019