УДК 629.071: (614.835+613.63)

А.П. КРЕМЕНА, Н.Ф. СВИРИДЕНКО

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ И ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЛИВОВ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА НА СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Показано, что повышение химической и взрывопожарной безопасности проливов компонентов топлив, образующихся на стартовых комплексах при авариях в процессе подготовки и осуществления пуска ракет-носителей, может быть обеспечено применением для их эвакуации в зону последующей нейтрализации диспергированных потоков технологических жидкостей на основе воды с высокой дальнобойностью и значительной площадью накрытия обрабатываемой зоны при возможности оперативного управления характеристиками дисперсности потока. Обоснован выбор гидроимпульсного метода генерирования таких потоков, предложен способ их применения, разработаны методические рекомендации по выбору параметров потоков и проектных параметров устройств для их генерирования, характеризующихся технологичностью, возможностью обеспечения устойчивой работы на жидкостях с порошковыми компонентами и совместимостью со штатным гидравлическим оборудованием систем безопасности стартового комплекса.

Показано, що підвищення хімічної та вибухопожежної безпеки проливів компонентів палива, що утворюються на стартових комплексах при аваріях в процесі підготовки і здійснення пуску ракет-носіїв, може бути забезпечено застосуванням для їх евакуації в зону подальшої нейтралізації диспергованих потоків технологічних рідин на основі води з високою далекобійністю і значною площею накриття обробленої зони при можливості оперативного управління характеристиками дисперсності потоку. Обґрунтовано вибір гідроімпульсного методу генерування таких потоків, запропоновано спосіб їх застосування, розроблені методичні рекомендації з вибору параметрів потоків і проектних параметрів пристроїв для їх генерування, що характеризуються технологічністю, можливістю забезпечення стійкої роботи на рідинах з порошковими компонентами і сумісністю зі штатним гідравлічним устаткуванням систем безпеки стартового комплексу.

It is shown that the improvement of chemical and explosion-fire safety of spillage of propellant components due to accidents at the launching complexes during the launch preparation is provided by dispersed flows of the process liquids, based on long-rang water spraying and a significant area of a treated zone with the possibility of controlling the flow dispersion characteristics, for their evacuation into the zone of the ensuing neutralization. Selection of a hydropulse method of generation of such flows is valid, the technique of their applications is proposed, methodic recommendations for selecting the flow parameters and designs parameters of devices for their generation are made. Those devices are characterized by the technological effectiveness, operation with powder-components liquids and compatibility with standard hydraulic equipment for LC safety systems.

Подготовка и осуществление пуска ракет-носителей (РН) является наиболее напряженным и ответственным этапом эксплуатации стартового комплекса (СК), характеризующимся повышенной вероятностью возникновения аварий и наличием большого количества потенциальных источников различного вида опасностей (взрывопожарной, химической, электрической, тепловой и т. п.). Эти аварии способны инициировать каскадное развитие их последствий вплоть до катастрофических масштабов [1]. В связи с этим задача повышения безопасности обслуживающего персонала и уникального энергонасыщенного оборудования СК неизменно является предметом особого внимания. Ее значимость характеризуется отнесением СК РН, наряду с ядерными объектами, предприятиями по уничтожению химического оружия и т. п., к объектам с особым статусом, в связи с чем на них, в частности, не распространяются типовые положения Государственного стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 12.3.047-98, устанавливающего требования и регламентирующего мероприятия по обеспечению взрывопожарной безопасности технологических процессов и производственных объектов различного назначения.

Сложившаяся к настоящему времени структура системы безопасности СК и используемые в ней средства [2, 3] рассчитывались на обеспечение приемлемого на время создания систем безопасности (СБ) уровня защищен-

ности обслуживающего пуски РН персонала и сооружений СК. Однако, к настоящему времени подавляющее большинство оборудования эксплуатируемых СК космодромов СНГ выработало свой технический ресурс (к тому же неоднократно продленный) и капитально не ремонтировалось в течение последних 20 – 30 лет [4], что повышает вероятность возникновения различного рода аварий в процессе подготовки и осуществления пуска РН.

Ретроспективный анализ аварий, произошедших в течение 1958 – 2013 гг. на СК при проведении предпусковых и пусковых операций, показал, что значительную опасность представляют аварии, сопровождающиеся образованием проливов компонентов топлива (КТ) как потенциальных комплексных источников химической и взрывопожарной опасностей [3, 5].

Это обусловлено тем, что многие широко используемые КТ являются высокотоксичными веществами, характеризующимися к тому же повышенной коррозионной активностью и взрывопожарной опасностью их паровоздушных смесей [6].

В этой связи достаточно указать, что, например, предельно допустимая концентрация (ПДК) паров несимметричного диметилгидразина (НДМГ) в воздухе рабочей зоны составляет 0,1 мг/м^3, тетраоксида азота (АТ) – 2 мг/м^3, керосина – 300 мг/м^3. При этом обнаружение наличия паров отдельных КТ в воздухе по запаху возможно только при их содержании, значительно превышающем ПДК. В частности, для НДМГ указанное превышение составляет более 12 ПДК, для АТ – 5 ПДК [6].

К разряду легковоспламеняющихся жидкостей относятся НДМГ, пары которого образуют с воздухом взрывопожароопасные смеси с температурой вспышки $t_{всп}=18^0$С в диапазоне изменения содержания в них пара от 2 до 85% об., керосин с $t_{всп} = 30^0$С в диапазоне изменения концентрации пара в воздухе от 0,6 до 8% об. и т. д. [7].

Для эвакуации проливов КТ со СК и их нейтрализации применяют различные по физико-химической сущности, агрегатному состоянию и химическому составу агентов методы, учитывающие особенности КТ.

Так, например, эвакуация проливов горючих осуществляется преимущественно путем их орошения водой из расчета два и более объема на один объем КТ и смыва в спецканализацию для последующей нейтрализации.

Проливы АТ обрабатывают большим количеством воды или водными растворами солей основного характера (сода, гашеная известь и т. п.). Образующиеся при этом растворы, как правило, химически агрессивны по отношению к конструкциям из алюминиевых сплавов.

Нейтрализацию проливов эвакуированных со СК окислителей и горючих осуществляют в специальных зонах сжиганием в термических агрегатах с использованием углеводородного горючего [2, 6].

Однако, применяемые в настоящее время средства и методы не позволяют обеспечивать нормативные уровни химической и взрывопожарной безопасности паровоздушной зоны, формирующейся над проливом в процессе его растекания и последующей эвакуации со СК, ввиду низкой растворимости паров КТ в воде [8], которая, к тому же, уменьшается с увеличением температуры воды и окружающего воздуха. Кроме того, высокая температура окружающей среды является фактором, интенсифицирующим скорость испарения КТ в проливе, а характерной особенностью СК является наличие зна-

чительного количества источников мощных энергетических импульсов, способных осуществить поджиг паровоздушной смеси в зоне над проливом [9].

Изложенное предопределяет необходимость поиска рациональных средств и совершенствования способов их применения с целью обеспечения возможности быстрой химически и взрывопожаробезопасной эвакуации возникающих на СК проливов в зону их последующей нейтрализации.

При выборе решения задачи необходимо исходить из того, что:

– повышение уровня защищенности объектов СК необходимо обеспечивать без значительных изменений существующей СБ и с минимальными затратами материальных ресурсов и времени;

– новые элементы и технологии, включаемые в состав СБ, должны быть согласованы с технологическим процессом подготовки и осуществления пуска, обеспечивая при этом максимальное использование располагаемого потенциала существующих СБ.

Давление насыщенного пара над поверхностью жидкости, от которого зависит его текущая концентрация в паровоздушной зоне над проливом, определяется соотношением [10]

$$P_S = P_{кр} \cdot \left\{ \exp\left[0{,}06 r \cdot M \cdot \left(\frac{1}{T_{кр}} - \frac{1}{T_{пвр}} \right) \right] \right\}^{2{,}22}, \text{ Па}, \qquad (1)$$

где r – теплота испарения, соответствующая температуре поверхности жидкости, кДж/кг; $P_{кр}$ и $T_{кр}$ – критические параметры жидкости, Па и К соответственно; M – молекулярная масса жидкости, кг/кмоль; $T_{пвр}$ – температура жидкости в проливе, К.

Зависимость, связывающая значение теплоты испарения с температурой жидкости и хорошо согласующаяся с экспериментальными данными для жидкостей, относящихся к различным термодинамическим группам, имеет вид [11]

$$r = r_{пл}\left(0{,}602\overline{T}^{\,0{,}33} + 3{,}459\overline{T}^{\,0{,}79} + 4{,}627\overline{T}^{\,1{,}21} - 6{,}896\overline{T} - 1{,}106\overline{T}^{\,2} + 0{,}315\overline{T}^{\,3}\right), \quad (2)$$

где $r_{пл}$ – теплота плавления, кДж/кг; $\overline{T} = \dfrac{T_{кр} - T_{пвр}}{T_{кр} - T_{пл}}$ – приведенная температура; $T_{пл}$ – температура плавления (застывания) жидкости, К.

Приведенные соотношения (1) и (2) позволяют с ошибкой, не превышающей 10% во всем диапазоне изменения состояния жидкости (т. е. от $T_{пл}$ до $T_{кр}$), вычислять парциальное давление паров над ее поверхностью, скорость испарения и текущую концентрацию пара у поверхности пролива, т. е. концентрацию на линии насыщения C_s [9, 12]

$$C_s = \frac{P_S}{P_0} \cdot 100, \text{ \% об.}; \qquad (3)$$

$$C_s = 0{,}12 \frac{C_s(\%\text{об.}) \cdot M_п}{2{,}24 T_0}, \text{ кг/м}^3, \qquad (4)$$

где P_0 – атмосферное давление, Па; T_0 – температура окружающей среды, К; M_n – молекулярная масса пара, кг/кмоль.

Перенос пара от поверхности пролива в воздушное пространство над ним происходит путем молекулярной диффузии за счет градиента его концентраций.

Соотношение, описывающее изменение концентрации пара по высоте воздушного пространства над поверхностью испарения, полученное в [12] в пренебрежении поправкой Стефана в законе Фика, имеет вид:

$$C_n(Z) = C_s\left(1 - \frac{Z^2}{H_{np}^2}\right), \tag{5}$$

где Z – высота над поверхностью пролива, м; H_{np} – высота паровоздушного слоя, на которой $C_n = 0$, м.

Такая модель паровоздушного слоя, самовосстанавливающегося за счет постоянной подпитки испаряющимися с поверхности пролива КТ, подтверждена экспериментальными данными о реальных процессах формирования паровоздушной зоны над жидкостью, протекающих во впервые заполняемых крупных резервуарах для хранения нефтепродуктов [12].

В соответствии с указанной моделью время проникания пара от поверхности пролива до высоты $Z = H_{np}$ определяется выражением

$$\tau_{np} = \frac{H_{np}^2}{D_{np}} \cdot \frac{1 - C_s}{12}, \text{ с}, \tag{6}$$

где D_{np} – приведенный коэффициент диффузии пара в воздухе, м^2/с, который в случае отсутствия справочных данных может быть определен по соотношению [13]:

$$D_{np} = \frac{0{,}043 T_{np}^{3/2} \sqrt{1/M_в - 1/M_n}}{\left(v_n^{1/3} - v_в^{1/3}\right)}, \text{ м}^2/\text{с}, \tag{7}$$

где $M_в$, M_n – молекулярные массы диффундирующего воздуха и пара, соответственно, кг/кмоль; v_n, $v_в$ – молекулярные объемы диффундирующего пара и воздуха, соответственно, л/кмоль.

Скорость испарения КТ (с учетом ветра) определяется формулой [14, 15]

$$\dot{m}_{исп} = 3{,}8 \cdot 10^{-3} \sqrt{M_n} \cdot \lg \frac{P_0}{P_0 - P_S} \cdot e^{(0{,}05 V_B - 0{,}06)}, \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}, \tag{8}$$

где V_B – скорость ветра, м/с ($V_B \geq 1{,}2$ м/с), а масса пара, находящегося в паровоздушном слое над одним метром квадратным пролива – соотношением [12]

$$M_{ПВС} = \frac{\rho_n \cdot C_S}{3} \cdot H_{np}, \text{ кг/м}^2. \tag{9}$$

При этом средняя по высоте проникания (H_{np}) концентрация пара в паровоздушном слое составляет $\overline{C}_s$ = 33% об.

Для снижения уровня взрывопожарной и химической опасностей пролива КТ на СК в процессе его эвакуации необходимо обеспечить:

– уменьшение скорости испарения КТ с поверхности пролива;

– экранирование паровоздушного слоя над проливом от энергетических потоков из окружающей среды (излучение, горячие газы и т.п.);

– интенсивное снижение концентрации пара КТ в паровоздушном слое.

Эффективным средством комплексного решения указанных задач, без существенных изменений используемой техники и технологий проведения эвакуации, является применение капельных (диспергированных) потоков воды (или других технологических жидкостей на ее основе) с характеристиками дисперсности и геометрическими параметрами факела, обеспечивающими возможность одновременного накрытия всей зоны пролива в процессе его эвакуации со СК.

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, с учетом экспериментальных данных [16, 17] и соотношения (5),

$$Z = \frac{1}{2J} \cdot \ln \frac{k \cdot q_0}{14} + H_{пр} \sqrt{1 - \frac{C_{НКПВ}}{C_S}}, \text{ м}, \qquad (10)$$

где J – интенсивность капельного потока, кг/(м^2·с); k – коэффициент безопасности (k = 1,5 ÷ 2); $C_{НКПВ}$ – концентрация пара в паровоздушном слое, соответствующая нижнему пределу воспламенения (взрываемости), кг/м^3 [13, 16].

Капельная среда является также эффективным средством охлаждения потоков горячих газов, движущихся к зоне пролива. Это объясняется внесением в конвективную составляющую теплообмена между каплями и горячим газом теплоты фазового превращения. Выражение для расчета охлаждения потока газов с температурой $T_г$, движущегося в капельной среде протяженностью δ, полученное обработкой многочисленных экспериментальных данных [18], имеет вид:

$$\Delta T \le 0{,}014 \frac{(T_г - 373)^{1{,}07}}{C_{рг} \cdot T_г^{0{,}545}} \cdot \frac{\overline{W}_г^{0{,}143} \cdot \delta^{1{,}43}}{d_м^{0{,}572}} \cdot \frac{J}{\dot{m}_{гг}}, \text{ К}, \qquad (11)$$

где $T_г$ – температура потока горячих газов, К; $C_{рг}$ – теплоемкость газа, кДж/(кг·К); $\overline{W}_г$ – скорость движения горячего газа относительно капель, м/с; $d_м$ – медианный диаметр капель, м; $\dot{m}_{гг}$ – расход потока горячих газов, кг/(м^2·с).

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

Кинетика сорбции паров КТ капельной средой описывается уравнением [19]

$$\tau \approx \frac{Z}{\beta_c \cdot S_\Sigma} \cdot \ln \frac{C_0 - \dfrac{\dot{m}_{исп}}{\beta_c \cdot S_{\Sigma к}}}{C_{доп} - \dfrac{\dot{m}_{исп}}{\beta_c \cdot S_{\Sigma к}}}, \text{ с}, \qquad (12)$$

где τ – время сорбции паров КТ, с; Z – высота капельного слоя над поверхностью пролива, м; $S_{\Sigma к}$ – поверхность капель в слое высотой Z над поверхностью пролива площадью один метр квадратный, м^2; $\dot{m}_{исп}$ – скорость испа-

рения КТ, кг/(м^2·с); C_0 – начальная концентрация пара КТ в паровоздушном слое на высоте Z над поверхностью пролива, кг/м^3; $C_{доп}$ – допустимая концентрация пара в паровоздушном слое на высоте Z, кг/м^3

$$C_{доп} \le C_{ПДК}; \tag{13}$$

β_c – кинетический коэффициент сорбции [20]

$$\beta_c = \frac{m_{исп} \cdot S_{\Sigma к}}{2} \cdot \left(C_0 - C_{доп}\right), \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \tag{14}$$

Площадь поверхности капельного слоя жидкости, сорбирующего пары КТ над проливом, определяется плотностью капельного потока, диаметром капель в нем и скоростью их опускания.

Полагая поток монодисперсным с диаметром капель $d_м$ и интенсивностью подачи J, можно записать, что количество капель, одновременно находящихся над одним квадратным метром пролива, определится соотношением

$$n = \frac{6J}{\pi d_м^3 \rho_{ТЖ}} \cdot \frac{Z}{\overline{V}}, \text{ 1/м}^2, \tag{15}$$

где $\overline{V}$ – средняя скорость опускания капель к поверхности пролива, м/с; $\rho_{ТЖ}$ – плотность жидкости, кг/м^3.

Средняя скорость опускного движения капель

$$\overline{V} = V_n / 2, \text{ м/с}, \tag{16}$$

где V_n – предельно достижимая скорость опускания капель в воздухе, м/с.

Зависимость предельно достижимой скорости опускания от диаметра капель, полученная на основе экспериментальных данных по определению скорости падения капель дождя различной интенсивности, приведенных в [21], имеет вид

$$V_n = 3 \cdot 10^3 d_м + 0{,}5, \text{ м/с}, \tag{17}$$

где $d_м$ – диаметр капель, м.

С учетом (15) – (17) выражение для определения площади сорбирующей поверхности в капельном слое высотой Z над одним метром квадратным пролива будет иметь вид

$$S_{\Sigma к} = \frac{12J}{\rho_{ТЖ}} \cdot \frac{Z}{d_м\left(3 \cdot 10^3 d_м + 0{,}5\right)}, \text{ м}^2, \tag{18}$$

а уравнение (12), связывающее время достижения допустимой концентрации паров над проливом с параметрами капельного потока, может быть представлено с учетом (14), (16) и (17) в виде

$$\tau \approx \frac{\rho_{ж}^2 \cdot d_м^2 \left(3 \cdot 10^3 d_м + 0{,}5\right)^2}{72 \cdot Z J^2 \cdot m_{исп} (C_0 - C_{доп})} \cdot \ln \frac{C_0 - \dfrac{\rho_{ж}^2 \cdot d_м^2 \left(3 \cdot 10^3 d_м + 0{,}5\right)^2}{72 \cdot Z^2 J^2 \cdot (C_0 - C_{доп})}}{C_{доп} - \dfrac{\rho_{ж}^2 \cdot d_м^2 \left(3 \cdot 10^3 d_м + 0{,}5\right)^2}{72 \cdot Z^2 J^2 \cdot (C_0 - C_{доп})}}, \text{ с}. \tag{19}$$

Дополнительная интенсификация сорбционных процессов может быть достигнута использованием технологических жидкостей (ТЖ), состоящих из воды с добавками веществ, осуществляющих адсорбцию или химическую сорбцию паров над проливом [6, 19].

Следует отметить, что результатом взаимодействия потока диспергированной ТЖ с проливом, наряду с его экранированием от сторонних источников энергетических импульсов и сорбцией пара в паровоздушном слое, является дополнительное снижение скорости испарения, обусловленное формированием на поверхности пролива изолирующего слоя из ТЖ, а также разбавлением и перемешиванием пролива ее тонущими каплями (при $\rho_{ТЖ} > \rho_{КТ}$).

Капли полидисперсного потока, опускающиеся к поверхности пролива, взаимодействуют с ней, захолаживая ее наиболее прогретый поверхностный слой и способствуя тем самым снижению скорости испарения. Интенсивность взаимодействия определяется плотностью капельного потока, диаметром капель и скоростью их встречи с поверхностью пролива.

Если скорость капли у поверхности пролива находится в пределах $1<V<7$м/с, что характерно для условий рассматриваемой задачи, то в процессе столкновения с каплей упругая поверхность КТ прогибается и в ней образуется близкое к полусферическому углубление радиусом [22]

$$R_y = 0{,}43\left(\frac{\rho_{ТЖ}}{\rho_{КТ}}\right)^{0{,}25} d_м^{0{,}75} V_к^{0{,}5}, \text{ м.} \qquad (20)$$

При этом средняя толщина слоя ТЖ, растекающейся по поверхности полусферического углубления, составит

$$\delta_{ТЖ} = \frac{d_{мп}^3}{12R_y^2}, \text{ м.} \qquad (21)$$

В процессе обратного движения выведенной из равновесия поверхности к исходному положению («схлопывание» углубления) из примыкающего к углублению слоя жидкости толщиной $\delta_n \approx 0{,}44R_y$ формируется ее кумулятивная струя, на вершине которой сосредотачивается капля из ТЖ. В жидкостях с небольшой вязкостью (керосин, НДМГ, АТ и т. п.) указанный процесс повторяется два – три раза. Время одного цикла колебаний составляет около 0,01 с. Необходимо отметить, что хотя при толщине слоя пролива $\delta < 1{,}5R_y$ кумулятивная струя в центре углубления не образуется, однако ТЖ, растекаясь по поверхности углубления, образует на ней постоянно возобновляющийся изолирующий слой ТЖ площадью

$$\bar{S}_{из} = 0{,}4\frac{V_n \cdot J}{d_м^{1{,}5} \cdot \rho_{ТЖ}}, \text{ м}^2 \qquad (22)$$

на одном квадратном метре пролива.

Оценки показывают, что при $J \geq 0{,}2 \div 0{,}3$ кг/(м^2·с) и $d_к = (1 \div 2)\cdot 10^{-3}$ м, более 85 – 90% поверхности пролива будет покрыто изолирующим слоем ТЖ толщиной $\Delta_{из} \geq (0{,}005 \div 0{,}01)$ мм, что обусловливает снижение скорости испарения КТ с его поверхности.

Если $\rho_{ТЖ} > \rho_{КТ}$, то в дальнейшем более тяжелая ТЖ будет тонуть, перемешивая КТ в проливе и разбавляя его, что также приводит к снижению скорости испарения и концентрации пара в паровоздушной зоне над проливом.

В целом, изложенное позволяет сделать вывод, что применение потоков диспергированных ТЖ на основе воды для подавления или уменьшения интенсивности опасных факторов аварии может быть эффективным методом повышения химической и взрывопожарной безопасности эксплуатации СК при условии обеспечения:

– значительной (50 – 60м и более) дальнобойности и увеличенной площади накрытия;

– возможности оперативного управления характеристиками дисперсности;

– возможности устойчивой работы генерирующих потоки устройств на ТЖ, включающих порошкообразные сорбирующие компоненты.

Анализ различных способов диспергирования жидкостей, ориентированный на решение задачи повышения химической и взрывопожарной безопасности эксплуатации СК РН, позволил сделать вывод о целесообразности использования гидроимпульсного диспергирования для генерирования диспергированных потоков ТЖ, удовлетворяющих указанным выше требованиям.

Гидроимпульсное диспергирование является комбинацией гидравлического и импульсного способов, при котором пульсации давления в потоке, наиболее существенно влияющие на дисперсность, параметры и характеристики его факела, генерируются за счет энергии самого потока при фиксированном питательном напоре.

Соотношения для определения основных параметров и характеристик факела гидроимпульсной струи (ГИС) в зависимости от частоты пульсаций давления и параметров питающего потока имеют вид [17, 23, 24]:

– дальнобойность ГИС при угле установки ствола $\theta = 20 – 22^0$

$$L_{\max} \approx 1{,}9 d_0 \text{, м,} \tag{23}$$

где d_0 – диаметр спрыска ствола, м;

– питательный напор

$$H_n \approx 1{,}32 L_{\max} \text{, м;} \tag{24}$$

– расход ТЖ

$$Q \approx L_{\max}^2 \cdot H_n^{0,5} \text{, м}^3\text{/с;} \tag{25}$$

– медианный диаметр капель, м,

$$d_м = 0{,}4 \kappa f \frac{(1-\kappa f) H_n^{0,5} H_u^{0,5} + \kappa f \cdot H_u}{[(1-\kappa f) H_n + \kappa f \, H_u]^2} + 0{,}135 \frac{(1-\kappa f) H_n^{0,5} - \kappa f \, H_u^{0,5}}{(1-\kappa f) H_n + \kappa f \, H_u} \text{, м,} \tag{26}$$

где f – частота пульсаций давления, Гц; H_u – напор в импульсе, м; κ – коэффициент ($\kappa = 0{,}0025$);

– угол раскрытия факела ГИС

$$\beta_ф \approx 1{,}1 \overline{\beta}_{стр} \text{, град} \tag{27}$$

где $\overline{\beta}_{стр}$ – угол раскрытия сплошной струи ($\overline{\beta}_{стр} = 20 – 23^0$);

– площадь, накрываемая факелом ГИС

$$S_н = L_{\max}\left(d_{ф_0} + L_{\max} tg\frac{\beta_ф}{2}\right), \text{ м}^2, \quad (28)$$

где $d_{ф_0}$ – начальный диаметр факела ГИС

$$d_{ф_0} = 0{,}6\sqrt[3]{d_0^2 H_u^{0,5}}, \text{ м}. \quad (29)$$

Сопоставляя (10), (11), (18) с параметрами пролива КТ [15]:

– площадью

$$S_п \approx 2\frac{Q_{ж}^{0,78}}{\nu_{ж}^{0,38}} \cdot \tau_{раст}^{0,24}, \text{ м}^2, \quad (30)$$

где $Q_{ж}$ – объем разовой утечки КТ, м^3; $\nu_{ж}$ – вязкость вытекшей жидкости, м^2/с; τ – время растекания, с;

– толщиной слоя КТ

$$\delta_{пр} = \frac{\nu_{ж}^{0,38} \cdot Q_{ж}^{0,22}}{2\tau_{раст}^{0,24}}, \text{ м}, \quad (31)$$

можно осуществить обоснованный выбор характеристик диспергированного потока ТЖ (J, $d_м$, Z), обеспечивающего эффективное предотвращение взрывов и воспламенений проливов КТ и подавление факторов химической опасности.

В рамках реализации предлагаемого пути повышения химической и взрывопожарной безопасности эксплуатации СК РН разработаны проектные решения и способы применения унифицированных ствольных систем для генерирования ГИС с оперативно управляемыми характеристиками дисперсности и параметрами факела струи, характеризующиеся технологичностью и высокой работоспособностью и функциональной совместимостью со штатным гидравлическим оборудованием существующих СБ СК [24, 25].

Таким образом, предложен рациональный путь повышения химической и взрывопожарной безопасности эксплуатации СК РН и уровня защищенности его персонала в процессе подготовки и осуществления пуска, состоящий в использовании для эвакуации проливов КТ со СК и одновременного создания защитных капельных сред потоков диспергированных ТЖ с оперативно регулируемыми геометрическими параметрами факела, характеристиками плотности и дисперсности. Его реализация может быть эффективным комплексным решением рассматриваемой проблемы при минимальных затратах времени, материальных ресурсов и рациональном использовании потенциала гидравлического оборудования существующих СБ СК.

1. *Кремена А. П.* Концепция и пути повышения безопасности эксплуатации стартовых комплексов ракет-носителей / *А. П. Кремена, В. И. Перлик* // Космическая техника. Ракетное вооружение : Сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 1. – С. 93 – 100.
2. *Бирюков Г. П.* Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов : учебн. пособ. / *Г. П. Бирюков, Ю. Ф. Кукушкин, А. В. Торпачев.* – М. : Изд. МАИ, 2002. – 264 с.
3. *Степанов М. И.* Методологические подходы и принципы обоснования конструктивных и методологических требований при проектировании комплексов заправки ракет и космических аппаратов / *М. И. Степанов* // Космическая техника. Ракетное вооружение : сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2004. – Вып.1. – С. 67 – 71.

4. *Бармин И. В.* Научные и практические проблемы эксплуатации ракетно-космических комплексов в современных условиях / *И. В. Бармин* // Космонавтика и ракетостроение. – 1999. – №15. – С. 76 – 79.
5. *Железняков А. Б.* Тайны ракетных катастроф / *А. Б. Железняков.* – М. : ЭКСМО Яуза, 2004. – 544 с.
6. *Цуцуран В. И.* Военно-технический анализ состояния и перспектив развития ракетных топлив / *В. И. Цуцуран, Н. В. Петрухин, С. А. Гусев.* – М. : МО РФ, 1999. – 332 с.
7. Химмотология ракетных и реактивных топлив / Под ред. *А. А. Браткова.* – М. : Химия, 1987. – 380 с.
8. *Гороновский И. Т.* Краткий справочник по химии / *И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Ф. Некряч.* – К. : Наукова думка, 1974. – 992 с.
9. *Баратов А. Н.* Пожарная безопасность : учебн. пособ. / *А. Н. Баратов, В. А. Пчелинцев.* – М. : Изд. АСВ, 1997. – 176 с.
10. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ : учебн. пособ. / *Р. М. Петриченко, С. А. Батурин, Ю. Н. Исаков* и др. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1990. – 328 с.
11. *Торквато С.* Скрытая теплота парообразования широкого класса жидкостей / *С. Торквато, П. Смит* // Тр. Амер. об-ва инж. механ. – 1984. – №1. – С. 215 – 217.
12. Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов при их транспортировке и хранении / *Ф. Ф. Абузова, И. С. Бронштейн, В. Ф. Новоселов* и др. – М. : Недра, 1981. – 248 с.
13. *Рябцев Н. И.* Природные и искусственные газы / *Н. И. Рябцев.* – М. : Стройиздат, 1967. – 326 с.
14. *Саушев В. С.* Пожарная безопасность хранения химических веществ / *В. С. Саушев.* – М. : Стройиздат, 1982. – 128 с.
15. *Кремена А. П.* Модель пожара при разливе самовоспламеняющихся компонентов топлива на стартовом комплексе ракеты-носителя / *А. П. Кремена, Н. Ф. Свириденко* // Техническая механика. – 2010. – №4. – С. 109 – 118.
16. *Драйздейл Д.* Введение в динамику пожаров / *Д. Драйздейл ;* пер. с англ. *К. Бомштейна.* – М. : Стройиздат, 1990. – 424 с.
17. *Иванов Е. Н.* Пожарная защита открытых технологических установок / *Е. Н. Иванов.* – М. : Химия, 1975. – 200 с.
18. Эффективность охлаждения газового потока мелкодиспергированной влагой / *В. Т. Буглаев, М. Н. Лифшиц, Ф. В. Васильев, А. С. Стребков* // Теплоэнергетика. – 1986. – № 5. – С. 45 – 49.
19. Герметичність у ракетно-космічній техніці : навч. посіб. / *Ф. П. Санін, Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, В. А. Найдьонов.* – Дніпропетровськ : Вид. ДДУ, 1995. – 168 с.
20. *Ермашкевич В. Н.* Гидро- и термодинамика насосных систем энергоустановок на черырехокиси азота / *В. Н. Ермашкевич.* – Минск. : Наука и техника, 1987. – 287 с.
21. *Гаджиев Г. М.* Скорость падения капель дождя создаваемого дождевальной машиной «Фрегат» / *Г. М. Гаджиев* // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1977. – №7. – С. 26 – 27.
22. *Бабенко В. С.* Сравнительный анализ пожаротушащей эффективности различных механизмов взаимодействия диспергированной жидкости с зоной пожара разлива / *В. С. Бабенко, А. П. Кремена* // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. – №28. – С. 15 – 26.
23. *Бабенко В. С.* Гидроимпульсная струя: теория и характеристики диспергированного потока / *В. С. Бабенко, А. П. Кремена* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №5/7(65). – С. 48 – 54.
24. *Перлик В. И.* Проектирование систем генерирования дальнобойных потоков диспергированной пожаротушащей жидкости / *В. И. Перлик, А. П. Кремена* // Вісник Дніпропетровського університету. – 2006. – №9/2. – С. 120 – 125.
25. Патент на корисну модель 43922 Україна, МПК A62C 3/02 (2009.01). Спосіб гасіння пожежі диспергованою пожежогасильною рідиною / *Свириденко М. Ф., Заволока О. М., Кремена А. П.* ; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ. – u 2009 02989 ; заявл. 30.03.09 ; опубл. 10.09.2009, Бюл. №17.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

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

Получено 21.01.14,
в окончательном варианте 14.02.14