

ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ

Предложен подход к повышению пожаробезопасности эксплуатации стартовых комплексов ракет-носителей путем применения в составе стационарной системы лафетных стволов устройств генерирования гидроимпульсных струй с управляемой дисперсностью и увеличенной площадью покрытия факела.

Изложена методическая база расчета и выбора проектных параметров устройств, верифицированная огневymi экспериментами.

Запропоновано підхід до підвищення пожежобезпечності експлуатації стартових комплексів ракет-носіїв шляхом застосування в складі стаціонарної системи лафетних стовбурів пристроїв генерування гідроімпульсних струменів з керованою дисперсністю й збільшеною площею покриття факела.

Викладено методичну базу розрахунку й вибору проектних параметрів пристроїв, верифіцировану вогневыми експериментами.

An approach to increase firesafety of operation of launch vehicles launching complexes by employing hydro-impulse jet generated devices with controlled dispersion and an increased firejet covered area in a gun-carriage tubes system is proposed.

A methodical foundation for calculation and evaluation of design parameters of devices verified by fire experiments is presented.

Динамичное развитие рынка космических услуг и их роли в хозяйственной и социальной областях жизнедеятельности общества предопределяет необходимость наращивания количества запусков ракет-носителей (РН), что, в свою очередь, обуславливает более интенсивную эксплуатацию их стартовых комплексов (СК).

Одним из важнейших условий штатной эксплуатации СК РН является обеспечение пожарной безопасности при подготовке и осуществлении пусков РН. Наиболее значимым фактором пожаровзрывоопасности СК РН является наличие на них значительных количеств жидких компонентов топлив (КТ), в том числе находящихся в тонкостенных баках РН, конструкционный материал которых характеризуется чрезвычайно низкой огнестойкостью, на порядок меньшей, чем, например, огнестойкость ректификационных колонн нефтеперерабатывающих заводов [1]. Указанный фактор, наряду с энергетической насыщенностью СК, и, как следствие, наличием значительного количества потенциальных источников зажигания, обуславливает высокий уровень потенциальной опасности пожаров на СК, возникновение которых чревато возможностью их быстрого разрастания до катастрофических масштабов с крайне негативными последствиями [2].

Сложившаяся в процессе создания и отработки ракетных комплексов структура системы пожарной безопасности (СПБ) стартовых комплексов, используемые в ней способы и средства предупреждения и тушения пожаров позволяют обеспечивать достаточно надежную защиту персонала, оборудования СК и окружающей среды от возможных пожаров [3]. Однако, несмотря на достигнутый уровень эффективности СПБ СК РН, в практике эксплуатации стартовых комплексов по-прежнему имеют место серьезные аварии, сопровождающиеся масштабными пожарами.

Об этом убедительно свидетельствуют данные о зарегистрированных в период 1957 – 2003 гг. многочисленных (более 20) авариях на СК РН, инициировавших интенсивно развивавшиеся пожары, которые сопровождались серьезными повреждениями объектов и сооружений СК и выделением в ок-

ружающую среду значительных количеств токсичных продуктов сгорания компонентов ракетных топлив [2]. Ретроспективный анализ указанных аварий и инициировавших их событий позволяет сделать вывод, что эффективность существующих систем обеспечения пожаровзрывобезопасности эксплуатации СК РН, несмотря на отработанность их структурных элементов, резервирование и т.п. не соответствует требованиям современного, а тем более перспективного этапов развития ракетной техники. Кроме того, как отмечается в [4], большая часть объектов действующих космодромов, в том числе Плесецк и Байконур, создавалась десятки лет тому назад и к настоящему времени выработала неоднократно продленный технический ресурс. В связи с этим, существенно возрастает вероятность возникновения сопровождающихся пожарами аварий, особенно в процессе подготовки и осуществления пуска РН, являющегося наиболее сложным и опасным этапом эксплуатации СК.

Изложенное свидетельствует о том, что в перспективе актуальность проблемы обеспечения пожаробезопасности эксплуатации СК, учитывая условия работы их оборудования и сооружений, рост энергетических возможностей РН и стоимости полезных нагрузок (ПН), постоянно ужесточающиеся экологические требования и нарастающую конкуренцию на рынке пусковых услуг, будет прогрессивно возрастать. В связи с этим, повышение пожаротушащей эффективности СПБ СК РН до уровня, при котором с регламентируемой вероятностью исключается возможность возникновения пожара и его развития до масштабов, представляющих опасность для обслуживающего персонала, объектов инфраструктуры и оборудования СК и окружающей среды, является одним из важнейших приоритетов при осуществлении модернизации СК РН.

Мероприятия, направленные на повышение пожаровзрывобезопасности эксплуатации СК РН в процессе модернизации структурно сложной системы ее обеспечения, сложившейся на основе многолетнего опыта, сводятся к двум направлениям:

- экстенсивному, осуществляемому путем увеличения расхода пожаротушащих веществ на подавление возможных пожаров на СК;
- интенсивному, осуществляемому путем повышения пожаротушащей эффективности средств пожаротушения и совершенствования устройств для их генерирования и подачи в зону пожара.

Первое направление, связанное с необходимостью значительного наращивания объемов пожаротушащей жидкости (ПТЖ), хранящихся на СК, увеличения мощности и расходных характеристик гидравлического оборудования СПБ СК РН, характеризуется значительной капиталоемкостью, и его перспективы к настоящему времени практически исчерпаны. Это обусловлено как резким сокращением финансирования длительных и ресурсоемких капитальных ремонтов технологического и технического оборудования СК, так и установившейся тенденцией на продление сроков его эксплуатации [4].

Осуществление второго направления предполагает поиск наиболее эффективного пути повышения пожаробезопасности эксплуатации СК РН по критерию, являющемуся отношением ожидаемого повышения пожаротушащей эффективности располагаемого запаса ПТЖ к затратам на соответствующую модернизацию СПБ [1]. Это, в свою очередь, предполагает необходимость проведения сопоставительного анализа негативных последствий пожаров, развивающихся по различным сценариям на СК, и пожаротушащей эффективности предназначенных для борьбы с ними структурных элементов

СПБ с целью выявления наиболее «слабого звена» СПБ СК РН и образующих его технических средств и систем пожаротушения.

Рассмотрение различных сценариев пожаров на СК РН как объекте высокой пожароопасности, обусловленной чрезвычайно низкой огнестойкостью РН, большим количеством находящихся в ней высокоэнергетических и токсичных КТ, значительными размерами взрывоопасной зоны с высоким избыточным давлением и интенсивным тепловым излучением, позволяет сделать однозначный вывод о том, что наибольшую опасность представляют пожары разливов КТ [5, 6]. Скорость их распространения достигает 20 – 200 м²/мин, а причиняемый ими материальный, социальный и экологический ущерб может достигать катастрофических размеров, о чем свидетельствуют последствия аварий на космодроме Байконур в 1960 г., на СК РН «Атлас-Центавр» в 1965 г. и т.п. [2].

Для тушения таких пожаров предназначены входящие в состав СПБ СК РН стационарные системы лафетных стволов, осуществляющие подачу ПТЖ в очаг горения дальнобойными компактными струями с расстояний, на которых интенсивность теплового излучения факела пожара не превышает допустимых с точки зрения безопасности эксплуатации уровней.

Однако пожаротушающая эффективность компактных струй, осуществляющих подавление пожара путем охлаждения горящих в разливе КТ за счет их перемешивания с ПТЖ, невысока. Как отмечается в [1, 7], в этом случае эффективность использования пожаротушающего потенциала ПТЖ не превышает 2 – 3%, что объясняется существенной неравномерностью орошения при обработке зоны пожара и значительными непроизводительными потерями ПТЖ вследствие утечек из очага горения.

Анализ мировых тенденций совершенствования способов и средств тушения высокоэнергетических пожаров на открытых технологических установках, содержащих значительные количества горючих и легковоспламеняющихся жидкостей [8, 9], показывает, что существенное повышение пожаротушающей эффективности жидкостей может быть достигнуто их преобразованием в объемно-поверхностное средство тушения путем диспергирования.

Это обусловлено, главным образом, следующими обстоятельствами:

- интенсификацией тепломассообмена капельного потока ПТЖ с факелом пожара и поверхностью горящей пожарной нагрузки;
- уменьшением непроизводительных утечек ПТЖ из очага горения;
- экранированием пожарной нагрузки от теплового излучения факела пожара.

Кроме того, диспергированная ПТЖ является эффективным средством ликвидации проливов КТ, являющихся источниками повышенной пожароопасности. Это объясняется как отсутствием разбрызгивания при смыве пролива, так и интенсивной сорбцией паров КТ, обусловленной значительной поверхностью контакта фаз и большими значениями коэффициента массообмена [9].

Однако задача выявления рациональных путей реализации перечисленных достоинств диспергированных ПТЖ как в части выбора характеристик дисперсности, так и их получения далеко не однозначна.

Увеличение степени дисперсности ПТЖ хотя и интенсифицирует процессы тепломассообмена в факеле пожара, однако приводит к уменьшению ее количества, приходящего к поверхности горящего разлива КТ из-за уноса

мелких капель восходящими потоками продуктов сгорания в факеле пожара. С другой стороны, чрезмерно крупные капли ПТЖ, не успевая полностью испариться за время пребывания в факеле и очаге пожара, будут утекать из последнего, не используя полностью свой пожаротушающий потенциал.

В этом плане особую значимость, с точки зрения повышения пожаротушающей эффективности стационарной системы лафетных стволов на СК РН, приобретает задача выбора способа диспергирования ПТЖ, позволяющего управлять характеристиками дисперсности потока при фиксированном расходе и обеспечивать одновременное покрытие зоны пожара технологически приемлемым количеством потоков ПТЖ. В этом случае может быть осуществлено не только подавление пожара в начальной стадии его развития, но и эффективная защита инфраструктуры СК и самой РН от теплового излучения и воздействия высокотемпературных продуктов сгорания его факела [1].

Существенным аргументом в пользу выбора того или иного способа диспергирования ПТЖ, применительно к рассматриваемой задаче повышения пожаробезопасности эксплуатации СК РН, является возможность минимизации затрат на создание соответствующих технических устройств, максимально адаптированных (функционально и конструктивно) к гидравлическому оборудованию стационарной системы лафетных стволов СПБ СК РН.

Сравнительный анализ различных способов диспергирования жидкостей, реализующих их устройств и параметров генерируемых ими потоков показал, что в наиболее полной мере удовлетворяет приведенным выше требованиям гидроимпульсное диспергирование [10], представляющее комбинацию гидравлического и пульсационного способов. В этом случае экономичность и дальнобойность наиболее широко используемого в практике пожаротушения гидравлического диспергирования дополняются не только характерными для пульсационного диспергирования качеством и однородностью дробления, но и возможностью управления дисперсностью и интенсивностью распада струи при фиксированном расходе ПТЖ [11].

Обоснованность такого выбора подтверждается возможностью создания устройств генерирования гидроимпульсных струй (УГС), характеризующихся высоким уровнем преемственности в плане использования гидравлического оборудования существующих стационарных систем лафетных стволов СПБ СК РН, что позволит уменьшить расход на их модернизацию [12, 13].

Методической базой решения комплексной задачи повышения пожаробезопасности эксплуатации СК РН путем применения в стационарной системе лафетных стволов устройств генерирования гидроимпульсных струй ПТЖ, обеспечивающих возможность:

- эффективного предупреждения и подавления пожаров разливов КТ на СК РН;
- уменьшения уровня потенциальной опасности повреждения РН, ее полезной нагрузки и инфраструктуры СК тепловым излучением факела возможного пожара;
- снижения негативных экологических последствий аварий,

являются математические модели пожара разлива КТ [14, 15], процесса его тушения подаваемым извне потоком диспергированной ПТЖ [16] и гидроимпульсного диспергирования [11].

Математическая модель пожара разлива. При ее разработке особое внимание уделялось описанию начальной стадии развития пожара, что обу-

словлено малой инерционностью включения системы пожаротушения (12 – 15 с) и необходимостью быстрого подавления горения.

Модель адекватно описывает изменение основных параметров и характеристик пожара в процессе его развития.

Диаметр разлива

$$D_n = 1,52 \frac{Q_\Sigma^{0,17}}{v_{Ж}^{0,19}} \cdot \tau_p^{0,08}, \quad (1)$$

где Q_Σ – объем выброса КТ; $v_{Ж}$ – кинематическая вязкость КТ; τ_p – время растекания.

Средняя толщина слоя разлива

$$\delta = 0,68 \left(\frac{v_{Ж} Q_\Sigma}{D_n^2} \right)^{0,33}. \quad (2)$$

Температура поверхности горячей жидкости

$$t_{II} = t_0 + 24\tau^{0,25}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где t_0 – начальная температура КТ, $^\circ\text{C}$.

Скорость сгорания

$$\dot{m}_{сз} = K \cdot \frac{1,29 \left(\frac{t_{II}}{t_{ВСП}} \right)^{0,68} \cdot P_{t_{ВСП}} - 10^3}{\sqrt{\frac{R(t_{II} + 273)}{M_{II}(t_{II})}}} \cdot e^{(0,05V_B - 0,06)}, \quad (4)$$

где $t_{ВСП}$ – температура вспышки КТ, $^\circ\text{C}$; $P_{t_{ВСП}}$ – давление насыщенных паров КТ при $t = t_{ВСП}$; R – универсальная газовая постоянная; M_{II} – молекулярный вес паров горящего КТ; K – корректирующий коэффициент; $K = 28,3 - 0,18\tau$ при $\tau \leq 50$ с, $K = 19,45 - 0,005\tau$ при $\tau > 50$ с; V_B – скорость ветра.

Тепловыделение при пожаре

$$\dot{Q}_{II} = 0,785 D_{II}^2 \chi \cdot \dot{m}_{сз} Q_H, \quad (5)$$

где χ – коэффициент химического недожога ($\chi \approx 0,85 - 0,88$); Q_H – низшая теплота сгорания КТ.

Максимальная температура продуктов сгорания в факеле пожара

$$T = 3,913 T_\infty, \quad (6)$$

где T_∞ – температура окружающей среды.

Тепло, уносимое продуктами сгорания

$$\dot{Q}_{ПС} \approx 8,6 \cdot 10^{-7} \dot{Q}_{II} T_\infty^2 (1 + 0,76 \sqrt{\frac{\dot{Q}_{II}}{Z}})^2, \quad (7)$$

где $Z > 3,8 D_{II}^{0,8}$ – высота над поверхностью горения.

Модель процесса тушения пожара разлива подаваемым извне потоком диспергированной ПТЖ получена из рассмотрения процесса его взаимодействия с факелом пожара и пожарной нагрузкой, учитывающего сепарацию капель в восходящем потоке продуктов сгорания, их тепломассообмен с факелом и поверхностью горячей жидкости. Модель позволяет определять параметры и характеристики потока ПТЖ, обеспечивающего подавление горения за наперед заданное время, по соотношению

$$J_0 \approx 0,166 \cdot e^{\frac{0,81 \cdot 10^{-6} \cdot Z_{II}}{d_{M0}^2}} \left[2,2 \cdot e^{-13,9C} \left(\frac{\delta \cdot \rho_{КТ}}{\tau_T} \right)^{0,83} \cdot \dot{m}_{cz}^{0,17} + \frac{\dot{m}_{cz}^{0,17} \cdot Z_{II}^{1,5}}{(d_{M0}^2 \cdot 10^6 + 1,17 Z_{II}^2)^{0,286}} \right], \quad (8)$$

где J_0 – интенсивность подачи ПТЖ, $кз/(м^2 \cdot с)$; Z_{II} – высота подачи потока ПТЖ над поверхностью горения; d_{M0} – медианный диаметр капель потока ПТЖ, подаваемого на тушение; $\rho_{КТ}$ – плотность КТ; τ_T – время тушения; C – объемная концентрация смачивателя в ПТЖ (в долях единицы).

Математическая модель гидроимпульсного диспергирования потока ПТЖ описывает процесс диспергирования как повторяющуюся последовательность процессов трансформации и распада идентичных порций ПТЖ, истекающих из ствола в течение промежутка времени, равного периоду повторения импульсов давления. В результате распада порции ПТЖ образуется диспергированный поток, медианный диаметр капель которого определяется соотношением

$$d_{M0} = 0,55 \cdot \sigma_{ПТЖ} \cdot \gamma \cdot \frac{(1-\gamma)H_{II}^{0,5}H_{И}^{0,5} + \gamma \cdot H_{II}^{0,5}}{\left[(1-\gamma)H_{II} + \gamma \cdot H_{II} \right]^2} + 10^4 \cdot \nu_{ПТЖ} \cdot \frac{(1-\gamma)H_{II}^{0,5} - \gamma \cdot H_{И}^{0,5}}{(1-\gamma)H_{II} + \gamma \cdot H_{И}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{ПТЖ}$ – коэффициент поверхностного натяжения ПТЖ; $\nu_{ПТЖ}$ – кинематическая вязкость ПТЖ; H_{II} , $H_{И}$ – питательный напор и напор в импульсе, соответственно; $\gamma = 0,0025f$ – коэффициент заполнения импульса, где f – частота генерирования импульсов.

Геометрические параметры факела гидроимпульсной струи определяются следующими соотношениями:

– начальный диаметр

$$d_{\Phi_0} = 0,06 \sqrt[3]{\frac{L_{\max} \cdot H_{И}}{\Theta^{0,25}}}, \quad (10)$$

где L_{\max} – требуемая дальнобойность гидроимпульсной струи, определяемая условиями размещения УГС на СК РН; Θ – угол подачи гидроимпульсной

струи по отношению к горизонту, обеспечивающий ее максимальную даль-
нобойность ($\Theta \approx 20 - 22^\circ$);

– угол раскрытия струи

$$\beta_{\Phi} \approx 1,1\beta_{cmp}, \quad (11)$$

где β_{cmp} – угол раскрытия компактной струи ($\beta_{cmp} \approx 20 - 22^\circ$);

– площадь, накрываемая факелом

$$S_{\Phi} = L_{\max}(d_{\Phi_0} + L_{\max} \cdot \Phi g \frac{\beta_{\Phi}}{2}). \quad (12)$$

Принимая во внимание, что при одинаковых питательных напорах и диаметрах sprays дальность гидроимпульсной струи на 10 – 12% ниже, чем компактной [15], необходимая по условиям размещения УГС на СК дальность может быть обеспечена увеличением диаметра его sprays до значения

$$d_0 = \frac{L_{\max}}{\Theta^{0,25}} \cdot 10^{-3}. \quad (13)$$

При этом расход ПТЖ и интенсивность её подачи в зону, накрываемую факелом гидроимпульсной струи, определяется, соответственно, выражениями

$$\dot{M}_{ПТЖ} = 3,9 \cdot \rho_{ПТЖ} \cdot \frac{L_{\max}^2 \cdot H_{II}^{0,5}}{\Theta^{0,5}}, \quad (14)$$

и

$$J_0 = \frac{\dot{M}_{ПТЖ}}{S_{\Phi}} = \frac{3,9 \cdot \rho_{ПТЖ} H_{II}^{0,5}}{\Theta^{0,5} \left(\frac{d_{\Phi_0}}{L_{\max}} + \Phi g \frac{\beta_{\Phi}}{2} \right)}. \quad (15)$$

Приведенные соотношения позволяют определить характеристики дисперсности (d_{Φ_0}) гидроимпульсной струи, условия их получения (H_{II} , f), параметры факела струи (L_{\max} , d_{Φ_0} , β_{Φ} , S_{Φ} , $M_{ПТЖ}$), обеспечивающие подавление пожара разлива в течение заданного времени τ_T .

Полученные данные являются исходными для расчета проектных параметров УГС, методика которого изложена в [17]. С ее использованием были спроектированы, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы лафетных стволов-генераторов гидроимпульсных струй [18].

Испытания проводились в Научно-исследовательском центре №2 УкрНИПБ. При испытаниях определялись характеристики факела (дальность и расход) в режимах генерирования стволами компактных и гидроимпульсных струй при различных давлениях питания. Полученные результаты наглядно продемонстрировали, что разработанная методическая база проектирования УГС позволяет создавать образцы пожарно-технического вооружения, обеспечивающие возможность генерирования как компактных (силовых) струй ПТЖ, так и гидроимпульсных струй с управляемыми характе-

ристикami дисперсности и увеличенной площадью покрытия при сниженной дальнoбойности (по сравнению с компактной струей) на 12 – 15%.

Кроме того, указанные устройства оказались эффективными генераторами дальнoбойных струй низкократной воздушно-механической пены.

С целью проверки пожаротушащей эффективности гидроимпульсных струй и адекватности разработанного методического обеспечения проектирования УГС были проведены огневые эксперименты по тушению двух видов модельных пожаров (ДСТУ 3734 – 98):

- 377 В – горючее – бензин А-76 ($F_{п} = 12 \text{ м}^2$, $\delta = 0,02 \text{ м}$, время свободного горения $\tau = 60 \text{ с}$);
- 15 А – горючее – древесина влажностью 14% ($F_{п} = 65 \text{ м}^2$, время свободного горения $\tau = 600 \text{ с}$).

В качестве ПТЖ использовался трехпроцентный раствор пенообразователя «ППЛВ-Универсал» марки 103.

Подача ПТЖ на тушение осуществлялась УГС, генерирующим полидисперсный поток с медианным диаметром капель $d_M \approx 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (расчетное значение) и расходом 0,78 кг/с, с расстояния, обеспечивающего полное накрытие очага горения факелом струи.

Результаты огневых экспериментов продемонстрировали высокую пожаротушащую эффективность гидроимпульсных струй. Затраты ПТЖ на тушение модельных пожаров оказались существенно ниже рекомендуемых действующими нормативами [19]: в 35 раз – по пожару кл. 377В ($\tau = 178 \text{ с}$) и в 5 раз – по пожару кл. А15 ($\tau = 89 \text{ с}$). При этом расхождение расчетных и экспериментально полученных значений пожаротушащей интенсивности не превышает 12 – 15%, что свидетельствует об адекватности разработанного методического обеспечения.

В целом, изложенные в настоящей статье результаты исследований подтверждают эффективность предложенного подхода к повышению пожаробезопасности эксплуатации СК РН путем применения в составе стационарной системы лафетных стволов («слабое звено» СПБ) устройств генерирования гидроимпульсных струй ПТЖ. Это позволит, используя различные средства пожаротушения (воду, ПТЖ, диспергированные ПТЖ, пены, суспензии) и способы их подачи, существенно (минимум в 2 – 3 раза) повысить эффективность использования пожаротушащего потенциала хранящегося на СК РН запаса ПТЖ, обеспечить возможность экранирования РН, оборудования и сооружений стартового комплекса от теплового потока излучения факела пожара и эффективной ликвидации проливов КТ при минимальных затратах ресурсов на модернизацию.

1. *Иванов Е. Н.* Пожарная защита открытых технологических установок / *Е. Н. Иванов.* – М. : Химия, 1975. – 200 с.
2. *Железняков А.* Тайны ракетных катастроф / *А. Железняков* – М. : ЭКСМО Яуза, 2004. – 544 с.
3. *Бирюков Г. П.* Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов : Учебн. пособ / *Г. П. Бирюков, Ю. Ф. Кукушкин, А. В. Торопов.* – М. : Изд. МАИ, 2002. – 264 с.
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. *Кремена А. П.* Пожары на стартовых комплексах ракет-носителей – анализ сценариев и обоснование рационального метода тушения / *А. П. Кремена* // Пожежна безпека. – 2002. – №2. – С. 44 – 48.
6. *Балаклеийский А. В.* Анализ пожарной опасности разливов нефти и нефтепродуктов / *А. В. Балаклеийский* // Проблемы пожарной безопасности. – 2002. – Вып. 11. – С. 9 – 16.
7. *Захматов В. Д.* Зависимость величины расхода огнетушащих составов от способа подачи их в очаг горения / *В. Д. Захматов* // Многофазные потоки в энергоустановках : Сб. науч. трудов ХАИ – Харьков, 1988. – С. 66 – 73.

8. Шрайбер Г. Огнетушащие средства : Химико-физические процессы при горении и тушении : Монография / Г. Шрайбер, П. Порст. – М. : Стройиздат, 1975. – 240 с.
9. Абрамов Ю. А. Моделирование процессов в пожарных стволах / Ю. А. Абрамов, В. Е. Росоха, Е. А. Шаповалова. – Харьков : Фолио, 2001. – С. 178 – 191.
10. Пат. на винахід 26542 Україна МПК В05В1/08. Спосіб та пристрій для здобування струменя рідини з керованою дисперсністю крапель / Свириденко М. Ф., Олексій Ю. С. та ін.– 96093645; заявл. 23.09.1996; опубл. 11.10.1999, Бюл. №6. – 7 с.
11. Бабенко В. С. Диспергирование гидроимпульсной струи / В. С. Бабенко, И. К Манько, А. П. Кремена // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – №16. – С. 21 – 34.
12. Пат. на винахід 58612 Україна, МПК А62С31/00. Пожежний ствол /Заволока О. М., Свириденко М. Ф. та ін. – 2001031838; заявл. 20.03.2001; опубл. 15.08.2003, Бюл. №8. – 3 с.
13. Пат. на винахід 60373 Україна, МКІ А62С3/00. Пристрій для одержання струменя рідини з керованою дисперсністю крапель / А. П. Кремена, Ю. С. Олексій, О. О. Нода та ін. – 2001031839; заявл. 20.03.2001; опубл. 15.10.2003, Бюл. №10. – 3 с.
14. Воротинцев Е. В. Зонная модель факела пожара разлива горючей жидкости / Е. В. Воротинцев, А. П. Кремена, Н. Ф. Свириденко // Техническая механика. – 2003. – №2. – С. 125 – 130.
15. Кремена А. П. Скорость сгорания нефтепродуктов при пожарах разливов/ А. П. Кремена., Н. Ф. Свириденко // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. – №4. – С. 166 – 169.
16. Кремена А. П. Определение пожаротушающей интенсивности полидисперсного потока жидкости / А. П. Кремена // Теория и практика металлургии. – 2003. – №4. – С. 63 – 68.
17. Кремена А. П. Синтез конструктивно-компоновочных схем устройств генерирования гидравлических импульсов / А. П. Кремена // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2005. – №10. – С. 50 – 53.
18. Бабенко В. С. Результати випробувань ручного диспергувального пожежного ствола на основі використання гідроімпульсних систем / В. С. Бабенко, В. Ф. Кравчуновський, В. В. Присяжнюк, А. П. Кремена // Пожежна безпека. – №3. – С.91 – 95.
19. Иванников В. П. Справочник по тушению пожаров / В. П. Иванников, П. П. Ключ, Л. К. Мазур. – К. : РИО МВД УССР, 1975. – 226 с.

Институт технической механики
 НАН Украины и НКА Украины,
 Государственное предприятие «Конструкторское
 Бюро «Южное» им. академика М. К. Янгеля»,
 г. Днепропетровск

Получено 8.02.09,
 в окончательном варианте 23.02.09