

## Экспериментально-аналитическое исследование возникновения выплеска топлива через воздухозаборный патрубок эмульсионного распылителя

© К.Т. Ниязбаев, И.А. Ивченкова, В.А. Кудрявцев, А.В. Кудрявцев

АО ТМКБ «Союз» (в составе АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»), г. Лыткарино, 140080, Россия

*Представлено исследование инжектора с газодинамическим распылом топлива (далее — горючего). Широкое применение этого эмульсионного распылителя ограничено из-за недостаточной изученности рабочих процессов, протекающих внутри канала инжектора и на выходе из него при критических значениях давлений и температур воздуха. Приведен анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании выплеска горючего из воздухозаборного патрубка эмульсионного распылителя при различных значениях набегающего потока воздуха и геометрических параметров выходных отверстий распылителя. Дана оценка выплеска с точки зрения газодинамики воздушных потоков внутри распылителя. Разработана модель, описывающая условия возникновения выплеска горючего с точки зрения кинематики движения капель, предложено физическое обоснование предпочтительности ее использования. Показан аналитическим методом полученный характеристический комплекс, связывающий явление выплеска горючего с режимами работы и геометрическими параметрами топливно-распределительного устройства. По результатам аналитических расчетов проведено обобщение имеющихся экспериментальных данных, показана графическая зависимость, отображающая границу появления выплеска горючего из воздухозаборного патрубка эмульсионного распылителя. Рекомендованы способы предотвращения появления выплеска.*

**Ключевые слова:** *прямоточный воздушно-реактивный двигатель, камера сгорания, топливно-воздушная смесь, двухфазная среда, эмульсионный распылитель*

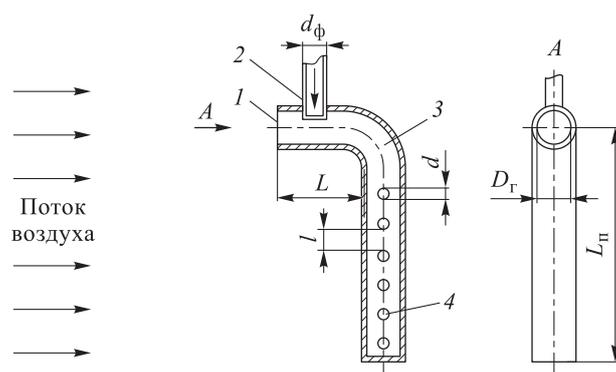
**Введение.** В настоящее время схема организации процесса горения с подачей горючего в струйные (однофазные) и аэродинамические (эмульсионные, двухфазные) распылители широко применяется в камерах сгорания (КС) прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), работающих в широком диапазоне изменения температуры и давления поступающего в них воздуха. Так, в перспективных ПВРД температура и давление воздуха изменяются в диапазоне от 400 до 2000К и от  $4 \cdot 10^5$  до  $10^6$  Па соответственно. Это обуславливает использование подобной схемы подачи горючего в камеру сгорания ПВРД [1, 2].

Рассмотрим функционирование системы смесеобразования на основе эмульсионной деструкции топлива (ЭДТ). При этом жидкий компонент подводится в КС в виде газокапельной смеси (топливовоздушной эмульсии) устройствами типа эмульсионного распылителя [3].

Необходимо отметить, что количество работ, посвященных исследованию подачи горючего данного типа, ограничено, причем большинство из них имеют сугубо статистический характер. Кроме того, выводы по результатам исследований довольно сильно различаются и зачастую противоречат друг другу [4–8].

Цель данной работы — формирование единого подхода к определению возможности выплеска горючего из воздухозаборного устройства эмульсионного распылителя, основанного на многочисленных экспериментальных данных, полученных в результате отработки натуральных изделий.

**Принцип работы.** Рассматриваемый инжектор эмульсионного распылителя состоит из воздухозаборного устройства, объединенного с системой подачи жидкого компонента (воздухозаборник), и распределительного устройства, представляющего собой канал с дозирующими отверстиями. Принципиальная схема его работы приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема работы эмульсионного распылителя:

1 — горло распылителя; 2 — система подачи жидкого компонента;  
3 — канал эмульсионного распылителя; 4 — дозирующие отверстия

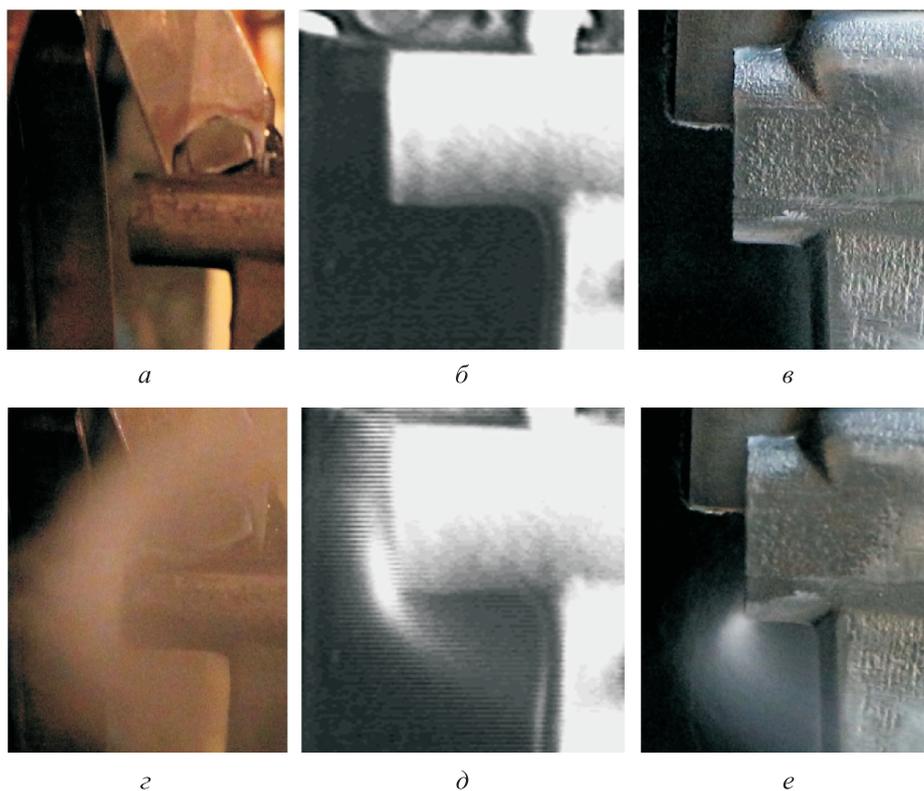
Под воздействием скоростного напора набегающий поток воздуха поступает в патрубок длиной  $L \left( \frac{L}{D_r} = 0,1 \dots 3,0 \right)$ , где  $D_r = 4S/P = 19,6$  мм;  $S$  — площадь входа в патрубок;  $P$  — периметр входа в патрубок воздухозаборного устройства (ВЗУ) распылителя.

На начальном участке ВЗУ через струйную форсунку диаметром  $d_\phi = 0,5 \dots 1,5$  мм происходит подача жидкого компонента. После этого горючее перемешивается с потоком воздуха, в результате чего образуется топливовоздушная смесь (ТВС). Затем готовая смесь движется по каналу, в котором под воздействием перепада статического давления на выходных отверстиях диаметром  $d = 1,5 \dots 3,0$  мм,

расположенных друг от друга на расстоянии  $l = 1,5 \dots 3,5$  мм, она подается в КС, распределяясь в ее поперечном сечении [9].

Особенностью работы эмульсионных распылителей является то, что на некоторых режимах происходит вылет капель (выплеск) жидкого компонента из воздухозаборного устройства навстречу потоку (рис. 2). Это явление нежелательно, так как попадание горючего в периферийные зоны КС, в частности в систему воздушно-заградительного охлаждения жаровой трубы КС, а также смещение области горения в зону перед фронтальным устройством могут привести к самовоспламенению горючего в этой зоне при высоких скоростях полета.

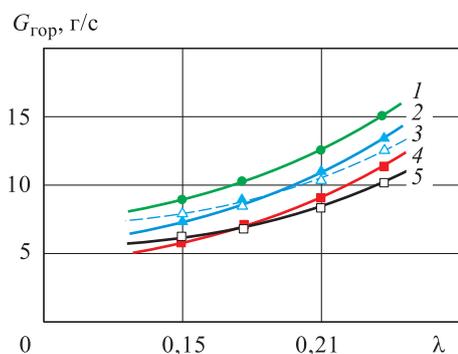
Фотографии эмульсионных распылителей с круглым воздухозаборным устройством различного диаметра приведены на рис. 2, *а*, *б*, с отверстием типа «овал» — на рис. 2, *в*, работающие на режимах без выплеска и с выплеском — на рис. 2, *г*, *д* и *е*.



**Рис. 2.** Работа эмульсионного распылителя без выплеска (*а–в*) и с выплеском (*г–е*)

**Газодинамическая постановка задачи.** Качественная зависимость появления выплеска, основанная на имеющихся экспериментальных данных по работе эмульсионных распылителей при отно-

сительной скорости набегающего потока воздуха  $\lambda = 0,1...0,3$ , температуре набегающего потока воздуха  $T_b = 500\text{K}$  и расходе горючего  $G_{гор} = 10...40$  г/с, а также при конструкционных изменениях выходных отверстий распылителя  $F_{вых}/F_{вх}$  ( $F_{вых}$  — суммарная площадь выходных отверстий распылителя,  $F_{вх}$  — площадь входа в воздухозаборный патрубок), равных 0,4 (базовое), 0,46 (увеличенные), 0,34 (уменьшенные), приведена на рис. 3. Область над кривой соответствует наступлению выплеска. Граница выплеска (см. рис. 3) зависит от расхода горючего через подающую форсунку  $G_{гор}$ , скорости набегающего потока  $V$ , а также от конструкционных параметров (диаметров и расположения выходных отверстий) эмульсионного распылителя.



**Рис. 3.** Качественная зависимость наступления выплеска:

1 — увеличенные диаметры  $d$  выходных отверстий, базовое распределение; 2 — базовое исполнение выходных отверстий; 3 — увеличенные диаметры выходных отверстий, перераспределение к периферии; 4 — уменьшенные диаметры выходных отверстий, базовое распределение; 5 — уменьшенные выходные отверстия, перераспределение к центру КС

Подобное явление, возникающее при работе эмульсионного распылителя, может быть связано с особенностями газодинамики течения входного воздуха в устройстве. На основании этого предположения был проведен ряд однофазных газодинамических расчетов в трехмерной постановке в программном комплексе ANSYS CFX для параметров потока на входе в расчетную область, соответствующих экспериментальным:  $\lambda = 0,15; 0,21; 0,28$ ,  $T_b = 500\text{K}$ ;  $F_{вых}/F_{вх} = 0,34; 0,40; 0,46$ .

Эмульсионный распылитель, имитируя экспериментальные условия, обдувается потоком воздуха с расстояния 30 мм, с заданной приведенной скоростью  $\lambda$  и температурой  $T_b$  (velocity-inlet). В выходном сечении расчетной области задавалось статическое давление 0,1 МПа (pressure-outlet). На боковых поверхностях расчетной области было установлено условие симметрии (symmetry) (рис. 4). Принята тетраэдрическая расчетная сетка с минимальным размером ячейки 0,5 мм и общим количеством элементов сетки 1,5 млн. Задана модель турбулентности  $k-\omega$ -SST. Сходимость решателя контролировалась

по разнице расходов на входе и на выходе в расчетную область. Расчет прекращался, когда разница расходов достигала значения  $0 \pm 0,01$  кг/с.

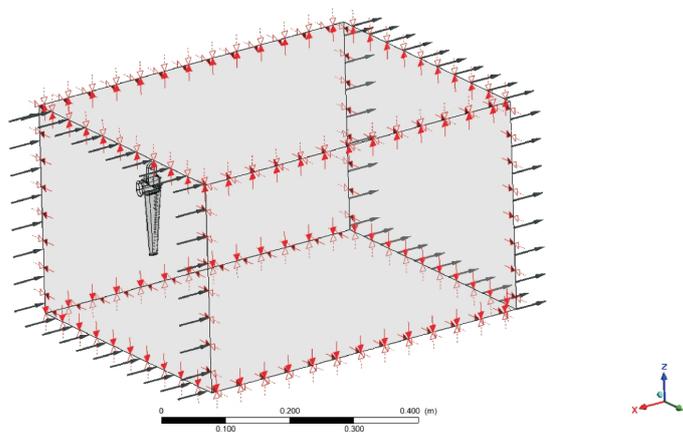


Рис. 4. Схема расчетной области в условиях газодинамической постановки задачи

Математическое моделирование газодинамических процессов внутри эмульсионного распылителя позволило выявить наличие сложного течения, состоящего из системы взаимодействующих вихрей, наиболее выраженных в головной и конечной частях канала распылителя. Тем не менее вихревое течение в головной части распылителя замкнуто, а значения скоростей существенно меньше значения скорости набегающего потока, что позволяет сделать вывод о независимости появления выплеска от возникающих внутри распылителя вихрей (рис. 5).

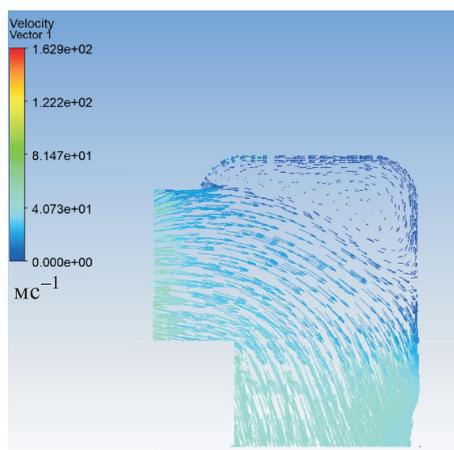


Рис. 5. Картина газодинамических вихрей в головной части эмульсионного распылителя ( $\lambda = 0,21$ ,  $F_{\text{ВЫХ}}/F_{\text{ВХ}} = 0,4$ )

В связи с этим принято решение исключить гипотезу о газодинамическом характере возникновения выплеска и рассмотреть возможные причины данного явления с точки зрения кинематики капель, двигающихся в потоке воздуха.

**Аналитическая расчетная модель.** Струя жидкого компонента, истекая из форсунки и ударяясь о стенку воздухозаборника, распадается на капли. Часть капель получают вектор направления движения навстречу входящему в ВЗУ воздуху. При определенных условиях эти капли могут вылететь из воздухозаборного устройства.

Для каждой капли рассмотрим следующую модель (рис. 6): капля массой  $M$  движется со скоростью  $W$  к входной кромке воздухозаборного устройства против потока воздуха, поступающего в патрубок со скоростью  $V$ . На каплю действует сила сопротивления воздуха, в связи с чем ее скорость будет уменьшаться. Если она упадет до нуля или примет отрицательные значения раньше, чем достигнет входной кромки на расстоянии  $r$ , то горючее останется в эмульсионном устройстве. Если же силы сопротивления воздуха будет недостаточно для уменьшения скорости до нуля, то произойдет выплеск.

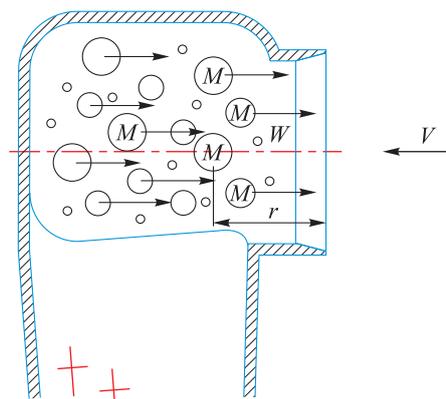


Рис. 6. Картина обратного течения капель

Общая формула для движения капли навстречу потоку может быть записана в виде

$$\frac{\partial(mW)}{\partial\tau} = F_{\text{сопр}}. \quad (1)$$

Для решения задачи приняты следующие допущения:

- капля имеет сферическую (шарообразную) форму;
- можно пренебречь изменением массы капли вследствие их слияния, вторичного дробления, отсутствие испарения (учитывать влияние данных процессов планируется в дальнейших работах);

– взаимодействие капель со стенками является абсолютно упругим, т. е. капли не налипают на стенку.

Тогда уравнение движения капли (1) примет вид

$$m_k \frac{dW}{dt} = -\varphi \frac{\pi d_k^2}{4} \frac{\rho(V+W)^2}{2}, \quad (2)$$

где  $m_k$  — масса капли, кг;  $W$  — скорость движения капли,  $W = 5...40 \frac{м}{с}$ , принимается равной скорости потока воздуха в патрубке ВЗУ (см. рис. 5);  $\varphi$  — коэффициент сопротивления шарообразной капли,  $\varphi = 24/Re$ , при условии  $Re = \frac{Wd_k\rho}{\mu} = 6...242$  ( $\mu = 26,7 \cdot 10^{-6}$  Па·с — коэффициент динамической вязкости воздуха);  $d_k$  — диаметр капли,  $d_k = 10...250 \cdot 10^{-6}$  м;  $\rho$  — плотность воздуха при  $T_B$ ,  $\rho = 0,674$  кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — скорость потока воздуха, м/с.

Принимая  $t = 0$  и  $W = W_0$ , после интегрирования получим

$$\ln \frac{W_0 + V}{W + V} = 18 \frac{\mu}{\rho_{гор} d_k^2}, \quad (3)$$

или

$$W = (W_0 + V) \exp\left(-18 \frac{\mu}{\rho_{гор} d_k^2} t\right) - V,$$

где  $\rho_{гор}$  — плотность горючего, кг/м<sup>3</sup>.

Повторное интегрирование в предположении, что  $t = 0, x = 0$ , дает значение величины хода капли ( $x$ ) в направлении, противоположном потоку воздуха:

$$x = \frac{(W_0 + V) \rho_{гор} d_k^2}{18\mu} \left(1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho_{гор} d_k^2} t\right)\right) - Vt. \quad (4)$$

Время движения капли найдем из условия, что на длине воздухозаборного «kozyрька» скорость движения капли обратится в нуль, т. е.

$$t = \frac{\rho_{гор} d_k^2}{18\mu} \ln\left(\frac{W_0 + V}{V}\right). \quad (5)$$

Используя (5), окончательно получим длину воздухозаборного патрубка, необходимого для предотвращения явления выплеска:

$$L = \frac{W_0 \rho_{\text{гор}} d_{\text{к}}^2}{18\mu} \left( 1 - \frac{V}{W_0} \ln \left( \frac{W_0}{V} + 1 \right) \right),$$

или

$$\frac{18\mu L}{\rho_{\text{гор}} W_0 d_{\text{к}}^2} = 1 - \frac{V}{W_0} \ln \left( \frac{W_0 + V}{V} \right). \quad (6)$$

В этом выражении остается неопределенной величина  $d_{\text{к}}$ .

Из всех возможных схем дробления струи жидкого компонента на капли наиболее подходящей схемой является распад пленки жидкости при ударе о твердую стенку. Возможный диапазон изменения вторичного критерия We (число Вебера), согласно (7), лежит в пределах  $0,02 < We < 12$ :

$$We = \frac{\rho W^2 d_{\text{к}}}{\sigma}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения горючего, Н/м.

В этом диапазоне, согласно [10],

$$\frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{ф}}} = \alpha We^{-n}, \quad (8)$$

где  $d_{\text{ф}}$  — диаметр форсунки, м;  $\alpha$  — безразмерное волновое число.

В данном случае выберем  $n = 0,24$  [10]. Используя выражение (8), а также  $G_{\text{гор}} = \rho_{\text{гор}} W_0 F_{\text{ф}}$ , из (6) получим характеристический комплекс, обозначающий границу появления выплеска для каждого конкретного режима работы и длины входного патрубка эмульсионного распылителя:

$$K = \frac{\mu L}{G_{\text{гор}} \Omega We^{-0,48}}, \quad (9)$$

где

$$\Omega = 1 - \frac{V}{W_0} \ln \left( \frac{W_0 + V}{V} \right). \quad (10)$$

С использованием полученных обобщений был обработан массив экспериментальных данных по исследованию выплеска, содержащий значения  $V$ ,  $W$  и  $G_{гор}$ , полученные в момент возникновения выплеска при  $L = 15$  и  $25$  мм. По зарегистрированным датчиками ДД1 и ДД2 значениям определялся перепад давления на дроссельной шайбе, а по расходной характеристике дроссельной шайбы определялся расход рабочей жидкости. На каждом режиме с заданным значением  $\lambda$  продувка проводилась дважды: с датчиками ДАП-18 (погрешность измерения  $\pm 4\%$ ) и МД-60 ( $\pm 1,5\%$ ). По измеренным значениям давления определялось значение  $\pi(\lambda)$  и затем с помощью газодинамических функций определялась и тем самым контролировалась фактическая величина коэффициента скорости воздушного потока. В результате обработки была выведена в графическом виде зависимость характеристического комплекса  $K$  от расхода горючего через подающую форсунку (рис. 7). В области графика ниже кривой наблюдается наличие выплеска. Схема установки и методика проведения эксперимента приведены в [9, 11].

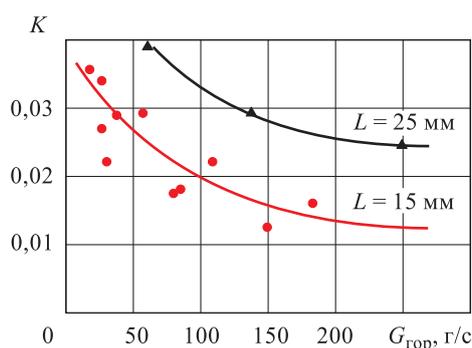


Рис. 7. Кривая начала выплеска

**Заключение.** Проведен анализ экспериментальных данных с целью исследования такого явления, как выплеск горючего из воздухозаборного патрубка эмульсионного распылителя. Проведена оценка выплеска с точки зрения газодинамики воздушного потока внутри распылителя, в результате чего сделан вывод о невозможности возникновения такого явления при данной постановке задачи.

Разработана математическая модель, описывающая условия появления выплеска с точки зрения кинематики движения капли внутри воздухозаборного патрубка эмульсионного распылителя. Получен характеристический параметр  $K$ , позволяющий обобщить многочисленные экспериментальные данные и обеспечивающий корректировку режимов работы топливно-распределительного устройства.



Рис. 8. Фото принудительно направленного выплеска

Согласно формуле для определения коэффициента  $K$ , чтобы снизить вероятность появления выплеска, целесообразно увеличить длину канала воздухозаборного устройства. Если это не удастся сделать, то можно принудительно направить выплеск к ядру потока, изменив геометрию канала эмульсионного распылителя (рис. 8).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клячко Л.А. Рабочий процесс в камерах сгорания ПВРД. *Труды ЦИАМ № 1307*. Москва, ЦИАМ, 2002, с. 4–5.
- [2] Горбатко А.А., Кудрявцев А.В. Стабилизация пламени и выгорание топлива в турбулентном потоке. *Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух книгах. Книга 2*. В.А. Скибин, В.И. Солонин, ред. Москва, Машиностроение, 2000, с. 351–356.
- [3] Горбатко А.А., Кудрявцев А.В. Обеспечение комплекса основных характеристик форсажно-прямоточных камер сгорания. *Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух книгах. Книга 2*. В.А. Скибин, В.И. Солонин, ред. Москва, Машиностроение, 2000, с. 360–363.
- [4] Артемьев Е.В., Востоков В.Ю., Клячко Л.А. Экспериментальное исследование процесса горения в модели камеры сгорания ПВРД с эмульсионно-карбюраторной системой смесеобразования. В сб.: Рабочий процесс в камерах сгорания ПВРД. *Труды ЦИАМ № 1307*. Москва, ЦИАМ, 2002, с. 77–95.
- [5] Кудрявцев А.В., Кунцев Г.М. Устойчивость процесса горения в камере сгорания с раздельной подачей топлива. В сб.: Рабочий процесс в камерах сгорания ПВРД. *Труды ЦИАМ № 1307*. Москва, ЦИАМ, 2002, с. 6–27.
- [6] Трушин Ю.М. Исследование горения в потоке при высоких начальных температурах. *III Всесоюз. совещание по теории горения*. Москва, ИХФ АН СССР, 1960, с. 79.
- [7] Birmaher S., Zeller P.W., Wirfalt P., Neumeier Y., Zinn B.T. Fuel Injection Scheme for a Compact Afterburner Without Flameholders. *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 2008, vol. 130, pp. 450.

- [8] Кудрявцев А.В., Горбатко А.А. Экспериментальное исследование выгорания топлива при его самовоспламенении в высокотемпературном потоке газа. *Теплофизика высоких температур*, 2012, т. 50, № 5, с. 1–3.
- [9] Ниязбаев К.Т., Ивченкова И.А., Кудрявцев В.А., Кудрявцев А.В. Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2145>
- [10] Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. *Распыливание жидкостей*. Москва, Машиностроение, 1977, 208 с.
- [11] Христинич В.А., Савченко В.И., Сергиенко Ю.М. Кузьменко В.И. и др. *Отчет по научно-исследовательской работе «Экспериментальное исследование гидрогазодинамики топливных коллекторов и структуры следа за стабилизаторным блоком»*. Киевский ордена Ленина политехнический институт имени 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции, 1990. 52 с.

Статья поступила в редакцию 23.05.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ниязбаев К.Т., Ивченкова И.А., Кудрявцев В.А., Кудрявцев А.В. Экспериментально-аналитическое исследование возникновения выплеска топлива через воздухозаборный патрубок эмульсионного распылителя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-7-2194>

**Ниязбаев Кирилл Тахирович** — инженер-конструктор отдела «Перспективного проектирования, пневмогидравлических и тепловых расчетов», АО «ТМКБ «Союз». e-mail: kirill.niazbaev@ya.ru

**Ивченкова Ирина Александровна** — студентка кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, техник отдела «Перспективного проектирования, пневмогидравлических и тепловых расчетов», АО «ТМКБ «Союз». e-mail: iv4enkova2017@yandex.ru

**Кудрявцев Василий Авенирович** — ведущий научный сотрудник экспериментально-исследовательского отдела, АО «ТМКБ «Союз». e-mail: vaskud58@mail.ru

**Кудрявцев Авенир Васильевич** — ведущий научный сотрудник экспериментально-исследовательского отдела, АО «ТМКБ «Союз».

## Experimental-analytical study of the occurrence of fuel splash through the air intake pipe of the emulsion atomizer

© K.T. Niazbaev, I.A. Ivchenkova, V.A. Kudryavtsev, A.V. Kudryavtsev

TMBDB «Soyuz» PJSC, Lytkarino, Moscow Region, 140080, Russia

*The study centers around an injector with gas-dynamic fuel atomization, i.e. an emulsion atomizer, which is not widely spread as the operating processes inside its channel and at its outlet at critical values of gas pressures and temperatures are poorly studied. First, we analyzed experimental data on the study of the fuel splash from the air intake pipe of the emulsion atomizer at various values of the oncoming air flow and the geometrical parameters of the outlet openings of the atomizer and evaluated the splash in terms of the gas dynamics of air flows inside the atomizer. Then, we developed a model that described the conditions for a fuel splash to occur from the point of view of the kinematics of the drops' movement, and attempted to physically justify why the model was preferable. Next, we applied an analytical method to obtain a characteristic complex that linked the fuel splash phenomenon with the operating modes and geometrical parameters of the fuel distribution device. Analytical calculations made it possible to summarize the available experimental data and to obtain a graphical dependence, showing the boundary of the occurrence of a fuel splash from the air intake pipe of the emulsion atomizer. Finally, we gave recommendations to prevent the occurrence of a splash.*

**Keywords:** ramjet engine, combustion chamber, fuel-air mixture, two-phase medium, emulsion atomizer

### REFERENCES

- [1] Klyachko L.A. Rabochiy process v kamerakh sgoraniya PVRD [Working process in ramjet combustion chambers]. *Tr. TsIAM No. 1307* [CIAM Proceedings no. 1307]. Moscow, CIAM Publ., 2002, pp. 4–5.
- [2] Gorbatko A.A., Kudryavtsev A.V. Stabilizatsiya plameni i vygoranie topliva v turbulentnom potoke [Flame stabilization and fuel burnout in a turbulent flow]. *Nauchny vklad v sozdanie aviatsionnykh dvigateley. V dvukh knigakh. Kniga 2* [Scientific contribution to the creation of aircraft engines. In two books. Book 2]. V.A. Skibin, V.I. Solonin, eds. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, pp. 351–356.
- [3] Gorbatko A.A., Kudryavtsev A.V. Obespechenie kompleksa osnovnykh kharakteristik forsazhno-pryamotochnykh kamer sgoraniya [Ensuring a set of basic characteristics of afterburner ramjet combustion chambers]. *Nauchny vklad v sozdanie aviatsionnykh dvigateley. V dvukh knigakh. Kniga 2* [Scientific contribution to the creation of aircraft engines. In two books. Book 2]. V.A. Skibin, V.I. Solonin, eds. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, pp. 360–363.
- [4] Artemev E.V., Vostokov V.Yu., Klyachko L.A. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa gorenija v modeli kamery sgoraniya PVRD s emulsionno-karbyuratornoy sistemoy smeseobrazovaniya [Experimental study of the combustion process in the combustion chamber model of a ramjet engine with an emulsion-carburetor mixture formation system]. In: *Rabochiy process v kamerakh sgoraniya PVRD. Tr. TsIAM No. 1307* [Working process in ramjet combustion chambers. CIAM Proceedings no. 1307]. Moscow, CIAM Publ., 2002, pp. 77–95.

- [5] Kudryavtsev A.V., Kuntsev G.M. Ustoychivost protsessa goreniya v kamere sgoraniya s razdelnoy podachey topliva [Stability of the combustion process in a combustion chamber with separate fuel supply]. In: *Rabochiy process v kamere sgoraniya PVRD. Tr. TsIAM No. 1307* [Working process in ramjet combustion chambers. CIAM Proceedings no. 1307]. Moscow, CIAM Publ., 2002, pp. 6–27.
- [6] Trushin Yu.M. Issledovanie goreniya v potoke pri vysokikh nachalnykh temperaturakh [Investigation of combustion in a stream at high initial temperatures]. *III Vsesoyuzn. soveschanie po teorii goreniya* [II All-Union. meeting on the theory of combustion]. Moscow, Institute of Chemical Physics USSR AS Publ., 1960, 79 p.
- [7] Birmaher S., Zeller P.W., Wirfalt P., Neumeier Y., Zinn B.T. Fuel Injection Scheme for a Compact Afterburner Without Flame holders. *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 2008, vol. 130, pp. 450.
- [8] Kudryavtsev A.V., Gorbatko A.A. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 5, pp. 1–3.
- [9] Niazbaev K.T., Ivchenkova I.A., Kudryavtsev V.A., Kudryavtsev A.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2145>
- [10] Dityakin Yu.F., Klyachko L.A., Novikov B.V., Yagodkin V.I. *Raspylivanie zhidkostey* [Atomization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 208 p.
- [11] Khristich V.A., Savchenko V.I., Sergienko Yu.M. Kuzmenko V.I., et al. *Otchet po nauchno-issledovatel'skoy rabote «Eksperimentalnoe issledovanie gidrogazodinamiki toplivnykh kollektorov i struktury sleda za stabilizatornym blokom»* [Report on the research work “Experimental study of the hydro-gas dynamics of fuel collectors and the wake structure behind the stabilizer block”]. Kievskiy ordena Lenina politekhnicheskiiy institut imeni 50-letiya Velikoy Oktyabrskoy sotsialisticheskoy revoliutsii Publ., 1990, 52 p.

**Niazbaev K.T.**, Design Engineer, Department of Advanced Design, Pneumohydraulic and Thermal Calculations, TMBDB “Soyuz” PJSC. e-mail: kirill.niazbaev@ya.ru

**Ivchenkova I.A.**, student, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University; Technician; Department of Advanced Design, Pneumohydraulic and Thermal Calculations, TMBDB “Soyuz” PJSC. e-mail: iv4enkova2017@yandex.ru

**Kudryavtsev V.A.**, Lead Research Fellow, Experimental Research Department, TMBDB “Soyuz” PJSC. e-mail: vaskud58@mail.ru

**Kudryavtsev A.V.**, Lead Research Fellow, Experimental Research Department, TMBDB “Soyuz” PJSC.