

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСИТЕЛЕЙ-КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОРБИТАЛЬНЫХ РАЗГОННЫХ БЛОКОВ\*

Ф. С. Фролов<sup>1</sup>, С. М. Фролов<sup>2</sup>, В. С. Посвянский<sup>3</sup>, И. В. Семенов<sup>4</sup>

**Аннотация:** Разработана физико-математическая модель, описывающая тепло- и массообмен плотной газозвеси капель воды с заторможенными высокотемпературными продуктами горения ракетного топлива, позволяющая оценить характеристики смесителей-конденсаторов для наземных испытаний ракетных двигателей орбитальных разгонных блоков. Проведенные расчеты показали, что использование водяных струй с каплями радиусом 0,5–0,2 мм с коэффициентом загрузки воды от 5 до 8 кг/м<sup>3</sup> позволяет снизить давление и температуру заторможенных продуктов горения водородно-кислородного двигателя в смесителе-конденсаторе от 0,6 до 0,03–0,05 атм и от 2700 до 300–360 К соответственно за времена от 10 до 50 мс. Приведенные оценки получены в предположении о пространственно однородном распределении водяных капель в объеме смесителя-конденсатора без учета таких эффектов, как «скольжение» фаз, а также деформация и дробление капель в газовом потоке. Ожидается, что при учете этих эффектов длина смесителей-конденсаторов не должна превышать 3–8 м.

**Ключевые слова:** стенд, имитирующий высотные условия; водородно-кислородный ракетный двигатель; смеситель-конденсатор; водяные струи; охлаждение и конденсация водяного пара; теоретическая модель; оценка характеристик

### Введение

Ракетные двигатели орбитальных разгонных блоков работают при давлении окружающей среды в несколько миллибар и меньше и оборудованы соплами с большой степенью расширения. Для испытаний и доводки таких двигателей используются стенды, имитирующие высотные условия [1, 2]. Основные элементы

\* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 15-08-00782).

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

<sup>2</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

<sup>3</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vsposv@chph.ras.ru

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук; Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, semenov@icad.org.ru

стендов — вакуумная камера, в которой размещен двигатель, газодинамическая труба, в которой сверхзвуковое течение выхлопных газов тормозится до относительно низкой дозвуковой скорости, смеситель-конденсатор, предназначенный для уменьшения объемного расхода продуктов горения за счет их охлаждения и за счет конденсации содержащегося в них водяного пара, и эжекторы, обеспечивающие откачку газов до требуемого рабочего давления.

Объект исследования в данной работе — смеситель-конденсатор, в котором для охлаждения продуктов горения и для конденсации содержащегося в них водяного пара используются распределенные струи воды. Цель исследования — разработать физико-математическую модель, описывающую тепло- и массообмен плотной газозвеси капель воды с заторможенными высокотемпературными продуктами горения ракетного топлива.

## Модель

Математическая модель основана на модели [3, 4], описывающей испарение, самовоспламенение и горение капли горючего в однородной монодисперсной капельной газозвеси в потоке окислительного газа. Модель [3, 4] была всесторонне проверена путем сравнения с экспериментальными данными по испарению, самовоспламенению и горению капель и капельных газозвесей индивидуальных углеводородов [3–5].

Рассмотрим замкнутый объем, заполненный однородной парогазовой смесью с каплями воды одинакового размера. Будем считать, что все капли имеют сферическую форму, а относительное движение фаз отсутствует. В момент времени  $t$  каждая капля занимает пространственную область  $0 < r < r_s$ , где  $r$  — радиальная координата с началом в центре капли. Поскольку размер капли  $r_s$  может изменяться во времени вследствие теплового расширения воды и вследствие ее испарения или конденсации водяного пара, поверхность капли  $r = r_s$  рассматривается как подвижная граница раздела фаз. Уравнение неразрывности для жидкости в капле имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho_d u_d) = 0,$$

где индекс  $d$  относится к капле;  $r$  — радиальная координата;  $\rho$  — плотность;  $u$  — скорость.

Распределение температуры в жидкости ( $0 < r < r_s$ ),  $T_d(t, r)$  описывается уравнением энергии:

$$c_d \rho_d \frac{\partial T_d}{\partial t} + c_d \rho_d u_d \frac{\partial T_d}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_d r^2 \frac{\partial T_d}{\partial r} \right);$$

$$T_d(0, r) = T_{d0}; \quad \left. \frac{\partial T_d}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad T_d(t, r_s) = T_g(t, r_s),$$

где  $T$  — температура;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности; индекс  $g$  относится к парогазовой смеси, окружающей каплю.

Равновесная массовая концентрация водяного пара (индекс  $v$ ) на поверхности капли определяется из закона Дальтона:

$$Y_v = \frac{P_v}{P} \frac{W_v}{\bar{W}},$$

где  $P$  — давление парогазовой смеси (зависит только от времени  $t$ );  $W$  — молекулярная масса; верхняя черта означает среднее значение для парогазовой смеси.

Парогазовая смесь занимает область  $r_s < r < R$ , где  $R$  — полурасстояние между соседними каплями в однородной монодисперсной капельной газозвеси<sup>1</sup>. Скорость и параметры состояния парогазовой смеси удовлетворяют уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho_g u_g) = 0$$

с граничными условиями

$$\rho_d \left( u_d - \frac{\partial r_s}{\partial t} \right) \Big|_{r=r_s} = \rho_g \left( u_g - \frac{\partial r_s}{\partial t} \right) \Big|_{r=r_s};$$

уравнению неразрывности компонентов:

$$\rho_g \frac{\partial Y_j}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_g r^2 Y_j V_j) - \rho_g u_g \frac{\partial Y_j}{\partial r}$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} Y_j(0, r) &= Y_{j0}, \quad j = 1, 2, \dots, N; \\ -\rho_d u_i \beta_j \Big|_{r=r_s} &= \rho_g Y_j \left( u_g - \frac{\partial r_m}{\partial t} \right) + \rho_g Y_j V_j \Big|_{r=r_s}; \\ \frac{\partial Y_j}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0, \quad j = 1, \dots, N; \\ X_j &= \frac{Y_j \bar{W}}{W_j}; \\ \frac{\partial X_j}{\partial r} &= \sum_{k=1}^N \left( \frac{X_j X_k}{D_{jk}} \right) (V_k - V_j); \\ \beta_j &= \begin{cases} 1 & \text{при } j = v; \\ 0 & \text{при } j \neq v \end{cases} \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Модель применима и к пространственно неоднородной капельной газозвеси [3].

и уравнению энергии

$$c_{pg}\rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_g r^2 \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) - c_{pg}\rho_g u_g \frac{\partial T_g}{\partial r}$$

с начальными и граничными условиями

$$T_g(0, r) = T_{g0};$$

$$T_g(t, r_s) = T_d(t, r_s); \quad \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=R} = 0,$$

где индекс 0 относится к начальному значению ( $t = 0$ );  $Y_j$  — массовая доля компонента  $j$ ;  $D_j$  и  $V_j$  — коэффициент диффузии компонента  $j$  и скорость его диффузии соответственно;  $N$  — количество компонентов в парогазовой смеси.

В дополнение к указанным выше уравнениям и соответствующим начальным и граничным условиям необходимо записать условие «сшивки» тепловых потоков на поверхности капли  $r = r_s$ :

$$\lambda_d \frac{\partial T_d}{\partial r} - \frac{\rho_{di} u_i L_v}{W_v} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r},$$

уравнение состояния парогазовой смеси

$$\rho_g = \frac{P\bar{W}}{R^0 T_g},$$

уравнение для равновесного давления пара над поверхностью воды [6]

$$P_v = \left[ \left( \frac{T}{\alpha} \right)^{1/8} - A \right] \cdot 10^5 \text{ [Па]},$$

где  $\alpha = 3,4679 \cdot 10^{-7} \text{ К}$ ;  $A = 12,4575$ , и условие сохранения массы  $M$  в сферическом объеме радиусом  $R$ , окружающем каплю радиусом  $r_s$ :

$$M = M_d(t) + M_g(t) = M_d(0) + M_g(0);$$

$$M_d(t) = \int_0^{r_s(t)} 4\pi r^2 \rho_d(t) dr; \quad M_g(t) = \int_{r_s(t)}^R 4\pi r^2 \rho_g(t) dr.$$

Здесь  $L_v$  — скрытая теплота парообразования;  $R^0$  — универсальная газовая постоянная. Из условия сохранения массы определяется давление в системе, которое считается однородным по всему объему.

Все теплофизические параметры фаз считаются переменными и определяются по известным соотношениям [3].

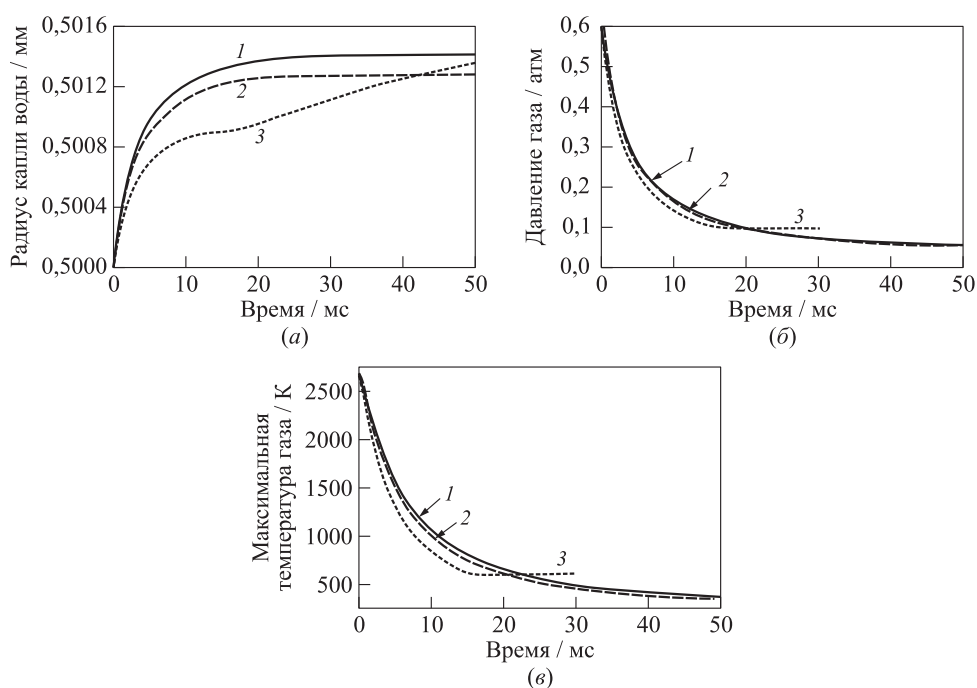
Система определяющих уравнений решается численно с использованием неконсервативной конечно-разностной схемы первого порядка аппроксимации и адаптивной подвижной расчетной сетки. Ошибка расчета контролируется отслеживанием балансов массы и энергии на каждом шаге по времени.

## Результаты расчетов

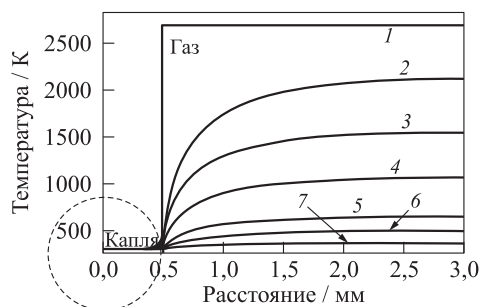
Математическую модель, описанную выше, применили для расчета охлаждения заторможенных выхлопных газов водородно-кислородного ракетного двигателя. Для определенности считали, что на входе в смеситель-конденсатор продукты горения состоят либо из 100 % (об.) водяного пара (смесь 100/0), либо из смеси 95 % (об.) водяного пара и 5 % (об.) водорода (смесь 95/5), либо из смеси 80 % (об.) водяного пара и 20 % (об.) водорода (смесь 80/20), а их статическая температура и статическое давление достигают значений 2700 К и 0,6 атм соответственно. В расчетах изменяли начальный размер капель воды  $r_{s0}$  и загрузочную плотность воды  $\eta$ , представляющую собой массу воды в единице объема смесителя-конденсатора:

$$\eta = \rho_{d0} \left( \frac{r_{s0}}{R} \right)^3.$$

В качестве первого примера рассмотрим результаты расчета для капель воды с  $r_{s0} = 0,5$  мм,  $T_{d0} = 293$  К и  $\eta = 4,63$  кг/м<sup>3</sup>. На рис. 1 показаны расчетные зави-



**Рис. 1** Расчетные зависимости радиуса капель воды (а), давления газа (б) и максимальной температуры газа (в) для смесей 100/0 (1), 95/5 (2) и 80/20 (3) при загрузочной плотности воды 4,63 кг/м<sup>3</sup> для капель начального радиуса 0,5 мм

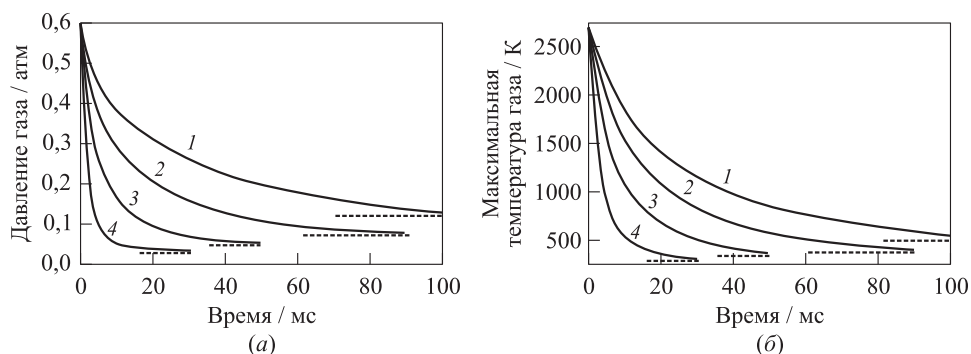


**Рис. 2** Расчетные пространственные распределения температуры воды и водяного пара для смеси 100/0 в разные моменты времени (1 —  $t = 0$  мс; 2 — 2; 3 — 5; 4 — 10; 5 — 20; 6 — 30; 7 —  $t = 50$  мс) при  $\eta = 4,63$  кг/м<sup>3</sup> для капель воды начального радиуса 0,5 мм

симости радиуса капли воды (рис. 1, а), давления газа (рис. 1, б) и максимальной температуры газа (рис. 1, в) для чистого водяного пара (кривые 1 для смеси 100/0) и для смесей водяного пара с водородом (кривые 2 для смеси 95/5 и кривые 3 для смеси 80/20). На рис. 2 представлены расчетные пространственные распределения температуры воды и водяного пара для смеси 100/0 в разные моменты времени.

Из рис. 1, а следует, что для смеси 100/0 при принятых условиях в смесителе-конденсаторе за время около 50 мс радиус капли воды увеличивается не более чем на 0,3% вследствие теплового расширения жидкости и конденсации водяного пара. За это же время теплоотвод в каплю и конденсация водяного пара на ее поверхности приводят к снижению давления до 0,054 атм (в 11,1 раз по сравнению с начальным давлением) и температуры газа до 380 К (в 7,1 раза по сравнению с начальной температурой). Интересно, что за указанное время в капле прогревается лишь тонкий приповерхностный слой жидкости (см. рис. 2 при  $r < 0,5$  мм). Тем не менее, теплоотвод в каплю играет основную роль в уменьшении давления водяного пара: в рассматриваемом примере 83% уменьшения давления связано с теплоотводом в жидкость и лишь 17% — с конденсацией водяного пара. Эти цифры получены на основе рассчитанного изменения массы пара  $M_g(t)$ . Отметим, что на температуру водяного пара также влияет выделение теплоты конденсации.

Наличие водорода в продуктах горения приводит к ускорению процесса теплоотвода из газа в жидкость (см. кривые 2 и 3 на рис. 1, в) за счет высокого коэффициента теплопроводности водорода. Такое влияние водорода на теплообмен капли жидкости с газом отмечалось авторами ранее при исследовании самовоспламенения капель углеводородных топлив в водородно-воздушных смесях [7]. Водород влияет и на массообмен между жидкостью и газом. Так, для смеси 80/20 с теплоотводом в жидкость связано 76% уменьшения давления (от 0,6 до 0,096 атм, см. рис. 1, б), а с конденсацией водяного пара — 24%, т. е. относительный вклад процесса конденсации увеличивается. Необычное поведение кривой 3 на рис. 1, а связано с тем, что в смеси 80/20 капля сначала длительное время ( $\sim 15$  мс) испаря-



**Рис. 3** Расчетные зависимости давления (а) и максимальной температуры водяного пара (б) от времени при изменении  $\eta$  (1 — 1,95 кг/м<sup>3</sup>; 2 — 2,92; 3 — 4,63; 4 — 8 кг/м<sup>3</sup>) для капель воды радиусом 0,5 мм в смеси 100/0. Пунктирные прямые соответствуют конечным значениям параметров

ется, термически расширяясь, а затем на ее поверхности начинается конденсация водяного пара. В смесях 100/0 и 95/5 этот эффект проявляется в значительно меньшей мере.

На рис. 3 показаны расчетные зависимости давления и максимальной температуры водяного пара от времени при изменении  $\eta$  от 1,95 до 8 кг/м<sup>3</sup> для капель воды радиусом 0,5 мм в смеси 100/0. Видно, что с ростом  $\eta$  возрастает скорость снижения давления и температуры продуктов горения, а время достижения конечных (равновесных) значений этих параметров сокращается. Для удобства в таблице представлены конечные значения давления и температуры продуктов горения, а также характерные времена, за которые давление и температура достигают значений, на 1%–2% превышающих эти конечные значения.

Конечные значения давления и температуры продуктов горения и характерные времена их достижения для смеси 100/0, достигаемые с каплями воды радиусом 0,5 и 0,2 мм

$r_{s0}$ , мм	$\eta$ , кг/м <sup>3</sup>	$P$ , атм	$T$ , К	$\tau$ , мс
0,5	1,95	0,122	548	100
	2,92	0,077	401	90
	4,63	0,055	367	50
	8,00	0,034	314	30
0,2	1,95	0,074	326	45
	2,92	0,057	314	30
	4,63	0,037	306	23
	8,00	0,031	302	7

Из таблицы следует, что для снижения давления водяного пара от 0,6 до 0,03–0,05 атм требуется время 30–50 мс при загрузочной плотности воды 5–8 кг/м<sup>3</sup> и начальном радиусе капель воды 0,5 мм. Следовательно, при скорости продуктов горения в смесителе-конденсаторе на уровне 300–400 м/с и при характерном времени указанного снижения давления 30–50 мс длина смесителя-конденсатора в заданных расчетных условиях не должна превышать 10–20 м. Если площадь поперечного сечения смесителя-конденсатора составляет, например, 4 м<sup>2</sup>, то расход воды, требуемый для обеспечения такой загрузочной плотности, может достигать 400 [м/с] · 4 [м<sup>2</sup>] · 8 [кг/м<sup>3</sup>] ~ 12 800 кг/с. При времени испытания двигателя 15 мин потребуются 12 800 [кг/с] · 15 · 60 [с] = 11 520 000 кг воды, т. е. потребуются водоем объемом 11 520 м<sup>3</sup> (диаметр 70 м, глубина 3 м). При использовании схемы с замкнутым циклом водоснабжения объем водоема будет существенно меньше.

Следует иметь в виду что в расчетной модели не учитывается относительное движение капель и газа. Эффект «скольжения» фаз приведет, скорее всего, к сокращению характерных времен снижения давления и температуры продуктов горения по сравнению с данными, приведенными в таблице для  $r_{s0} = 0,5$  мм. Это связано, во-первых, с интенсификацией процессов тепло- и массообмена, обычно выражаемой соотношением [8]:

$$Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3},$$

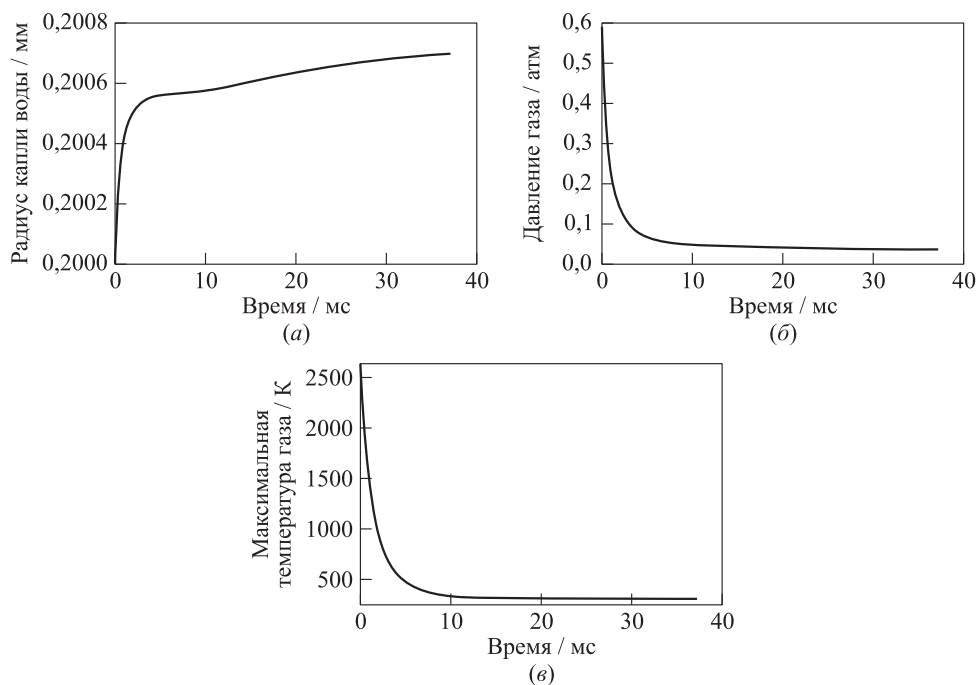
где  $Nu = 2\alpha r_s/\lambda_g$  — число Нуссельта;  $Re = 2Ur_s/v_g$  — число Рейнольдса относительного движения газа и капли;  $Pr = v_g/a_g$  — число Прандтля;  $U$  — относительная скорость газа и капли;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $v_g$  — коэффициент кинематической вязкости газа;  $a_g$  — коэффициент температуропроводности газа.

Во-вторых, относительное движение капель и газа может приводить к деформации и дроблению капель и, следовательно, к существенному увеличению площади поверхности раздела фаз. Так, следуя [9], деформация капель может привести к увеличению площади межфазной поверхности до 4 раз, а дробление — до 10 раз. Для количественной оценки возможного влияния эффекта дробления проведены расчеты с каплями воды меньшего размера ( $r_{s0} = 0,2$  мм) для смеси 100/0 при тех же параметрах газа (0,6 атм и 2700 К) и жидкости ( $T_{a0} = 293$  К).

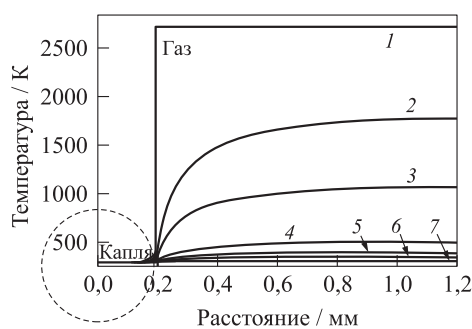
На рис. 4 (аналоге рис. 1 для смеси 100/0) показаны расчетные зависимости радиуса капель воды (рис. 4, а), давления (рис. 4, б) и максимальной температуры водяного пара (рис. 4, в), а на рис. 5 (аналоге рис. 2 для смеси 100/0) — расчетные пространственные распределения температуры воды и водяного пара в разные моменты времени при  $\eta = 4,63$  кг/м<sup>3</sup> для капель воды начального радиуса 0,2 мм (вместо 0,5 мм на рис. 2).

Из рис. 4, а следует, что для смеси 100/0 при принятых условиях в смесителе-конденсаторе за время около 40 мс радиус капли воды увеличивается не более чем на 0,35% вследствие теплового расширения жидкости и конденсации водяного

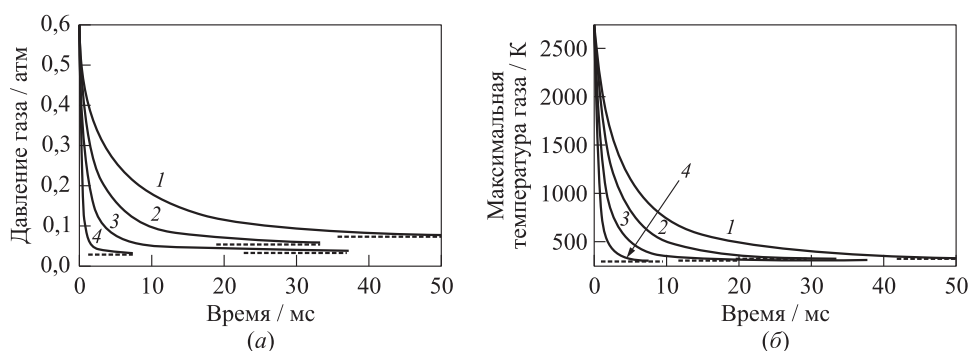




**Рис. 4** Расчетные зависимости радиуса капли воды (а), давления (б) и максимальной температуры (в) при  $\eta = 4,63 \text{ кг/м}^3$  для капльи воды начального радиуса 0,2 мм



**Рис. 5** Расчетные пространственные распределения температуры воды и водяного пара для смеси 100/0 в разные моменты времени (1 — 0 мс; 2 — 0,6; 3 — 1,6; 4 — 4,6; 5 — 7,1; 6 — 9,6; 7 — 37,6 мс) при  $\eta = 4,63 \text{ кг/м}^3$  для капльи воды начального радиуса 0,2 мм



**Рис. 6** Расчетные зависимости давления (а) и максимальной температуры водяного пара (б) от времени при изменении  $\eta$  (1 — 1,95 кг/м<sup>3</sup>; 2 — 2,92; 3 — 4,63; 4 — 8 кг/м<sup>3</sup>) для капле воды радиусом 0,2 мм в смеси 100/0. Пунктирные прямые соответствуют асимптотическим значениям параметров

пара. За это же время теплоотвод в каплю и конденсация водяного пара приводят к снижению давления от 0,6 до 0,037 атм (в 16,2 раза) и температуры газа от 2700 до 306 К (в 8,8 раз). Как и в капле радиусом 0,5 мм, за указанное время в капле радиусом 0,2 мм прогревается лишь тонкий приповерхностный слой жидкости (см. рис. 5 при  $r < 0,2$  мм), однако по-прежнему теплоотвод в каплю играет основную роль в уменьшении давления водяного пара: в рассматриваемом примере 82% уменьшения давления связано с теплоотводом в жидкость и 18% — с конденсацией водяного пара.

На рис. 6 приведены результаты расчетов снижения давления и максимальной температуры водяного пара от времени при изменении  $\eta$  от 1,95 до 8 кг/м<sup>3</sup> для капле воды радиусом 0,2 мм в смеси 100/0. Как и для капле радиусом 0,5 мм (см. рис. 3), с ростом  $\eta$  возрастает скорость снижения давления и температуры продуктов горения, а время достижения минимальных значений этих параметров сокращается. Однако по сравнению с рис. 3 характерные времена достижения конечных значений давления и температуры для капле радиусом 0,2 мм оказались существенно короче. Для удобства в рассмотренной выше таблице приведены конечные значения давления и температуры водяного пара, а также характерные времена, за которые давление и температура достигают значений, на 1%–2% превышающих эти конечные значения.

Из таблицы следует, что для снижения давления водяного пара от 0,6 до 0,03–0,04 атм требуется время 10–20 мс при загрузочной плотности воды 5–8 кг/м<sup>3</sup> и начальном радиусе капле воды 0,2 мм. Это время в 2–3 раза короче, чем для более крупных капле. Следовательно, при скорости продуктов горения в смесителе-конденсаторе на уровне 300–400 м/с длина смесителя-конденсатора в заданных расчетных условиях не должна превышать 3–8 м.

## Заключение

Таким образом, разработана физико-математическая модель, описывающая тепло- и массообмен плотной газовой взвеси капель воды с заторможенными высокотемпературными продуктами горения ракетного топлива, позволяющая оценить характеристики смесителей-конденсаторов для наземных испытаний ракетных двигателей орбитальных разгонных блоков. Проведенные расчеты показали, что использование водяных струй с каплями радиусом 0,5–0,2 мм с загрузочной плотностью воды от 5 до 8 кг/м<sup>3</sup> позволяет снизить давление и температуру заторможенных продуктов горения водородно-кислородного двигателя в смесителе-конденсаторе от 0,6 до 0,03–0,05 атм и от 2700 до 300–360 К соответственно за времена от 10 до 50 мс. Подчеркнем, что приведенные оценки получены в предположении о пространственно однородном распределении водяных капель в объеме смесителя-конденсатора без учета таких эффектов, как «скольжение» фаз, а также деформация и дробление капель в газовом потоке. Ожидается, что при учете этих эффектов длина смесителей-конденсаторов не должна превышать 3–8 м.

## Литература

1. *Haberzettl A., Gunder D., Zimmermann H., Poulin E., Delange J. F., Prevot Y., Kestemann M.* VULCAIN 2 Flight Load simulation device (LSD) // 1st EUCASS Proceedings, 2005. Moscow. CD.
2. *Nageswara Rao B., Vijayakumar Reddy K.* Performance of cooling hot gas discharge spray cooler with flow parameters variation // *Indian J. Sci. Technol.*, 2012. Vol. 5. No. 5. P. 2762–2764.
3. *Фролов С. М., Басевич В. Я., Посвянский В. С., Сметанюк В. А.* Испарение и горение капли углеводородного топлива. IV. Испарение капли с учетом коллективных эффектов // *Хим. физика*, 2004. Т. 23. № 7. С. 49–58.
4. *Фролов С. М., Басевич В. Я., Фролов Ф. С., Борисов А. А., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Гоц А. Н.* Корреляция между испарением и самовоспламенением капли // *Хим. физика*, 2009. Т. 28. № 5. С. 3–18.
5. *Басевич В. Я., Фролов С. М., Посвянский В. С., Веденеев В. И., Романович Л. Б.* Низкотемпературное самовоспламенение капли // *Хим. физика*, 2005. Т. 24. № 5. С. 89–98.
6. *Кузнецов Н. М.* Двухфазная смесь вода–пар. Уравнение состояния, скорость звука, энтропия // *Докл. АН СССР*, 1981. Т. 257. № 4. С. 858–864.
7. *Фролов С. М., Медведев С. Н., Басевич В. Я., Фролов Ф. С.* Самовоспламенение и горение тройных гомогенных и гетерогенных смесей углеводород–водород–воздух // *Хим. физика*, 2013. Т. 32. № 8. С. 43–48.
8. *Фролов С. М., Сметанюк В. А.* Тепло- и массообмен капли с газовым потоком // *Хим. физика*, 2006. Т. 25. № 4. С. 42–54.
9. *Борисов А. А., Фролов С. М., Сметанюк В. А., Полихов С. А., Сегал К.* Взаимодействие капли горючего с газовым потоком // *Хим. физика*, 2005. Т. 24. № 7. С. 50–57.

*Поступила в редакцию 01.11.14*

## EVALUATION OF AFTERCOOLER PERFORMANCE FOR GROUND TESTS OF ROCKET ENGINES FOR ORBITAL BOOSTERS

F. S. Frolov<sup>1,2</sup>, S. M. Frolov<sup>1,2</sup>, V. S. Posvyanskii<sup>1</sup>, and I. V. Semenov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

<sup>2</sup>Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation

**Abstract:** The physical and mathematical model describing heat and mass transfer in dense gas suspensions of water droplets in decelerated high-temperature combustion products of rocket fuel, allowing the characteristics of the aftercooler for ground tests of rocket engines for orbital boosters to be estimated, has been developed. Numerical calculations showed that the use of water sprays with drops of 0.5–0.2-millimeter radius with load factor from 5 to 8 kg/m<sup>3</sup> makes it possible to reduce the pressure and temperature of the combustion products of hydrogen–oxygen rocket engine in an aftercooler from 0.6 to 0.03–0.05 atm and from 2700 to 300–360 K, respectively, for a time period ranging from 10 to 50 ms. These estimates are obtained under the assumption of a spatially uniform distribution of water droplets in the aftercooler volume without regard for such effects as velocity slip between phases, as well as deformation and fragmentation of droplets in the gas stream. It is expected that with these effects taken into account, the length of the aftercooler should not exceed 3 to 8 m.

**Keywords:** high-altitude test facility; hydrogen–oxygen rocket engine; aftercooler; water sprays; cooling and condensation of water vapor; theoretical model; performance estimation

### Acknowledgments

The work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 15-08-00782).

### References

1. Haberzettl, A., D. Gunder, H. Zimmermann, E. Poulin, J. F. Delange, Y. Prevot, and M. Kestermann. 2005. VULCAIN 2 Flight Load simulation device (LSD). *1st EUCASS Proceedings*. Moscow, CD.
2. Nageswara Rao, B., and K. Vijayakumar Reddy. 2012. Performance of cooling hot gas discharge spray cooler with flow parameters variation. *Indian J. Sci. Technol.* 5(5):2762–2764.

3. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, V. S. Posvyanskii, and V. A. Smetanyuk. 2004. Isparenie i gorenie kapli uglevodorodnogo topliva. IV. Isparenie kapli s uchetom kollektivnykh effektov [Evaporation and combustion of fossil fuels drops. IV. Evaporation of droplets with the collective effects]. *Khim. Fiz.* 23(7):49–58.
4. Frolov, S. M., V. Ya. Basevich, F. S. Frolov, A. A. Borisov, V. A. Smetanyuk., K. A. Avdeev, and A. N. Gots. 2009. Korrelyatsiya mezhdru ispareniem i samovosplamneniem kapli [Correlation between drop evaporation and autoignition]. *Khim. Fiz.* 28(5):3–18.
5. Basevich, V. Ya., S. M. Frolov, V. S. Posvyanskii, V. I. Vedeneev, and L. B. Romanovich. 2005. Nizkotemperaturnoe samovosplamnenie kapli [Low-temperature drop autoignition]. *Khim. Fiz.* 24(5):89–98.
6. Kuznetsov, N. M. 1981. Dvukhfaznaya smes' voda–par. Uravnenie sostoyaniya, skorost' zvuka, izentropy [Two-phase mixture 'water–steam.' The state equation, the sound speed, isentropes]. *Dokl. AN SSSR* 257(4):858–864.
7. Frolov, S. M., S. N. Medvedev, V. Ya. Basevich, and F. S. Frolov. 2013. Samovosplamnenie i gorenie troynnykh gomogennykh i geterogennykh smesey uglevodorod–vodorod–vozdukh [Self-ignition and combustion of ternary homogeneous and heterogeneous mixtures hydrocarbon–hydrogen–air]. *Khim. Fiz.* 32(8):43–48.
8. Frolov, S. M., and V. A. Smetanyuk. 2006. Teplo- i massoobmen kapli s gazovym potokom [Heat and mass transfer of a drop with the gas stream]. *Khim. Fiz.* 25(4):42–54.
9. Borisov, A. A., S. M. Frolov, V. A. Smetanyuk, S. A. Polikhov, and K. Segal. 2005. Vzaimodeystvie kapli goryuchego s gazovym potokom [Interaction of fuel drop with the gas stream]. *Khim. Fiz.* 24(7):50–57.

Received November 1, 2014

## Contributors

**Frolov Fedor S.** (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; f.frolov@chph.ru

**Frolov Sergej M.** (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

**Posvyanskii Vladimir S.** (b. 1940) — Candidate of Science in physics and mathematics, head of laboratory, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; vsposv@chph.ras.ru

**Semenov Ilya V.** (b. 1973) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; leading research scientist, Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; semenov@icad.org.ru