

Д. А. Я г о д н и к о в, Ю. В. А н т о н о в,
Ю. Н. В л а с о в

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СОВОКУПНОСТИ КАПЕЛЬ ВОДЫ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГИДРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Приведена методика расчета основных характеристик процессов подачи воды и испарения полидисперсной совокупности капель в камере сгорания гидрореактивного двигателя. Получены пространственно-временные характеристики динамики испарения капель воды и установлено, что учет полидисперсного состава капель и их распределения по скорости и температуре позволяет повысить точность математического моделирования, подтверждаемую сравнением с экспериментальными данными.

E-mail: daj@mx.bmstu.ru; prog1185@mail.ru

Ключевые слова: испарение, распыливание, вода, полидисперсная совокупность, математическая модель, капля, численное исследование.

Анализ этапов развития комплексной теории внутрикамерных процессов в ракетных и реактивных двигательных установках позволяет сделать вывод о наличии тесной корреляции последней с динамикой роста вычислительных мощностей. В 1950-е гг. прошлого столетия определяющая роль в процессе разработки перспективных образцов специальной и гражданской техники отводилась экспериментальной отработке. Основная цель теоретических исследований состояла в корректном качественном описании всей совокупности явлений и механизмов, протекающих в камере сгорания (КС) того или иного типа двигателя без детальной проработки количественной составляющей. В настоящее время как в отечественной [1, 2], так и в зарубежной литературе [3, 4] отмечается рост номенклатуры теоретических работ, направленных прежде всего на принципиальную количественную и качественную корректировку ранее разработанных математических моделей.

Рассматриваемый в настоящей работе гидрореактивный двигатель (ГРД) предназначен для передвижения аппаратов в водной среде, поступающей в него в качестве окислителя, и представляет собой разновидность прямоточной силовой установки, схема которой приведена на рис. 1. Физику процессов, протекающих во внутреннем объеме такого двигателя, можно представить следующим образом. Продукты разложения пиротехнического состава (ПС), отходящие от поверхности горения, вступают во взаимодействие с водой, подаваемой в первую зону. В промежуточном сопле поток ускоряется, что способствует дроблению капель воды и интенсифицирует процессы тепломассообмена. Дожигание продуктов сгорания осуществляется во второй зоне

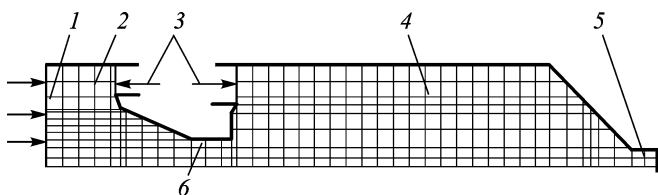


Рис. 1. Схема и расчетная область ГРД:

1 — поверхность горения пиротехнического состава; 2 — первая зона (камера сгорания); 3 — подача воды; 4 — вторая зона (камеры дожигания); 5 — тяговое сопло; 6 — промежуточное сопло

КС, куда также подается вода. При такой схеме организации рабочего процесса увеличивается суммарное время пребывания продуктов сгорания в КС, что повышает полноту сгорания топлива и эффективность преобразования полной энтальпии ПС в кинетическую энергию продуктов сгорания.

В настоящее время физика рабочих процессов в КС ГРД проработана на достаточно высоком уровне, чего нельзя сказать о количественной теории. Наиболее показательной в этом представлении является работа [5]. Авторы приводят в одномерной параметрической постановке теоретическое описание основных аспектов рабочего процесса, характерных для КС ГРД, обходя стороной ряд его принципиальных особенностей, что не позволяет говорить об актуальности модели на данном этапе развития теории многофазных турбулентных течений. В частности, на стадии выбора геометрических параметров зон горения и теплообмена камеры двигателя в целях организации высокоэффективного рабочего процесса с высокой полнотой сгорания необходимо знать длину пути испарения жидкого компонента топлива, которая будет существенно различной в зависимости от начального значения диаметра капли. В связи с этим большое практическое значение имеет корректное качественное и количественное описание сопутствующих процессов в общей математической модели.

Основной целью настоящей работы является разработка методики расчета одного из важнейших этапов рабочего процесса, протекающего в КС ГРД, — распыливание и испарение забортного окислителя во внутреннем объеме камеры двигателя.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость введения в общую расчетную методику моделей процессов распыливания, движения, испарения, дробления и возможной коагуляции капель жидкого окислителя. При этом важную роль играет отличие полей скоростей и температур диспергированной воды от аналогичных полей газообразной составляющей продуктов сгорания и частиц порошкообразного металлического горючего, входящего в состав топлива.

Основные этапы подачи забортного окислителя в КС ГРД, протекающие зачастую одновременно, можно условно подразделить на

распыливание, движение и испарение совокупности капель разных диаметров. Существует множество различных способов распыливания [6], среди которых следует выделить гидравлический, как наиболее часто встречающийся в принципиальных схемах смесеобразования ракетных и реактивных двигательных установок. Основным фактором, приводящим к диспергированию жидкости, является давление нагнетания. Физику процесса распыливания можно представить следующим образом. Проходя через форсунку поток ускоряется и преобразуется в форму, способствующую быстрому и эффективному распаду. В общем случае распад жидкости вызывают несколько факторов, а именно: капиллярные и внешние инерционные силы, турбулентные пульсации, кавитация. В зависимости от способа диспергирования могут превалировать один, либо несколько из перечисленных возмущений, но главной причиной разрушения струи является развитие в ее объеме колебательных процессов. Возникновение последних обусловлено действиями аэродинамических сил, деформирующих и разрывающих струю, и вибрациями, являющимися следствием качества изготовления форсунки и ее конструктивных особенностей. Начальные возмущения появляются одновременно и могут накладываться друг на друга, поэтому поверхностные колебания в зависимости от наложения фаз начальных возмущений и степени рассеяния энергии колебаний могут затухать, возрастать либо стабилизироваться [7, 8]. Рост и затухание колебаний обуславливаются физическими свойствами окружающей среды и режимом вытекания жидкости из соплового отверстия. В зависимости от начальной скорости потока возможно образование единичных капель, коротких струй и неравномерных капель, капель с приблизительно одинаковыми размерами, полидисперсной смеси капель. Причем на практике последнее является наиболее вероятным.

Процесс движения капель в потоке продуктов сгорания в значительной мере будет определяться их начальным диаметром. Скорость сравнительно тяжелых фракций существенно отличается от скорости газового потока. При этом для крупных капель характерны скорее процессы дробления. Легкие фракции, обладая стабильным для данных условий диаметром, увлекаются струей и часто испаряются без дробления. Вместе с тем существенное влияние на рабочий процесс оказывают акты столкновения различных фракций, результаты которых неоднозначны и определяются множеством факторов, таких как скорость капель относительно друг друга, импульс и др.

После выхода из форсунки поток жидкости начинает распадаться, при этом начальный диаметр образующихся капель зависит от ряда параметров, к которым можно отнести давление в КС p_k , перепад давления на форсуночной головке Δp_f , начальную температуру жидкости T_0 и ее физические свойства (плотность $\rho_{ж0}$ и коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_{ж0}$), радиус сопла форсунки r_c и ее конструкцию.

Перечисленные параметры фактически являются исходными данными для расчета процессов движения и испарения. Для замыкания системы уравнений баланса теплоты и вещества учитывают коэффициент избытка окислителя α и такие термодинамические характеристики продуктов сгорания, окружающих каплю, как газовая постоянная парогазовой составляющей потока $R_{\text{пг}}$, концентрация паров испаряющейся жидкости в объеме КС c_{∞} ; температура $T_{\text{пг}}$; теплоемкость $C_{\text{пг}}$, кинематическая вязкость $\nu_{\text{пг}}$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{пг}}$ парогаса соответственно.

Начальная абсолютная скорость движения капель определяется плотностью жидкости и перепадом давлений, реализуемых на смесительном элементе, в частности на форсуночной головке. В случае наклона форсунки под определенным углом к оси КС из соотношения (1) вычисляется модуль вектора скорости, а непосредственно в расчетах фигурируют его проекции на соответствующие оси:

$$u_{\text{ж}0} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{ф}}}{\rho_{\text{ж}0}}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что при рассмотрении ансамбля образующихся капель как монодисперсных заранее вносится существенная погрешность в результаты расчетов и если на ранних этапах развития теории численного моделирования движения многофазных сред подобное допущение встречалось практически во всех моделях, то в настоящее время значительный прогресс вычислительной техники позволяет избавиться от последнего путем рассмотрения движения конечного числа фракций полидисперсной совокупности капель. Говоря о моделировании распределения капель по размерам, необходимо отметить значительное число эмпирических уравнений, среди которых следует выделить логарифмически нормальное распределение [9], уравнение числовой частотной кривой, предложенное Нукиямой и Танасавой [10], и уравнение Розина–Раммлера [11, 12]. Однако выбор типа исходной кривой распределения капель по размерам — это прерогатива исследователя, и вид зависимости не является определяющим фактором при разработке комплексной методики расчета параметров рабочего процесса в объеме КС ГРД, где принципиально важны сам факт учета полидисперсности и число рассматриваемых фракций, которое прямо влияет на затраты машинного времени и точность моделирования.

Учитывая описанные обстоятельства при оценке распределения капель по размерам, воспользуемся одной из наиболее часто встречающихся функций распределения Розина–Раммлера:

$$V_s = 1 - e^{-\left(\frac{d_{\text{ж}}}{\bar{d}_{\text{ж}}}\right)^n}, \quad (2)$$

где V_s — суммарный относительный объем, т.е. сумма отдельных объемов всех капель, диаметр которых меньше или равен диаметру данной капли $d_{ж_i}$;

$$\bar{d}_{ж} = \frac{d_{ж.м}}{(\ln 2)^{1/n}} \quad (3)$$

— константа размера ($d_{ж.м}$ — медианный диаметр капель); n — константа распределения, определяемая по соотношению

$$n = \frac{\lg \left(\frac{\ln \frac{1}{1 - V_{s \max}}}{\ln 2} \right)}{\lg \left(\frac{d_{ж \max}}{d_{ж.м}} \right)}. \quad (4)$$

Приводя функцию V_s для конечного интервала размеров условимся, что при $d_{ж} = d_{ж. \max}$ суммарный относительный объем будет равен $V_s = V_{s \max} = 0,95$.

В настоящее время имеется широкий спектр зависимостей для оценки $d_{ж.м}$ в зависимости от условий окружающей среды и способа распыливания [9]. В общем виде это эмпирическое соотношение записывается следующим образом:

$$d_{ж.м} = f(\text{Re}^m, \text{Lp}^l, \text{We}^k, M, F, v), \quad (5)$$

где Re , Lp , We , M — числа Рейнольдса, Лапласа, Вебера и Маха соответственно; F — площадь впускного канала форсунки; v — скорость жидкости на входе.

Для определения медианного диаметра капли жидкости при условиях, реализуемых в камере ГРД, воспользуемся зависимостью (5), справедливой в диапазоне параметров $\beta = 30^\circ \dots 90^\circ$, $d_c = 1,0 \dots 2,0$ мм, $\Delta p_\phi = 0,2 \dots 1,0$ МПа, приведенной в работе [5]:

$$d_{ж.м} = 42,5\alpha^{0,23} \Delta p_\phi^{-0,23} d_c^{-0,43}, \quad (6)$$

где β — угол наклона струи к плоскости торца заряда; d_c — диаметр сопла форсунки.

Максимальный диаметр капли жидкости вычисляем, исходя из рекомендаций работ [7, 9, 11], по формуле

$$d_{ж \max} \approx 2d_{ж.м}.$$

В соответствии с приведенной методикой и в зависимости от параметров подачи и типа форсунки выполнялся расчет интегрального

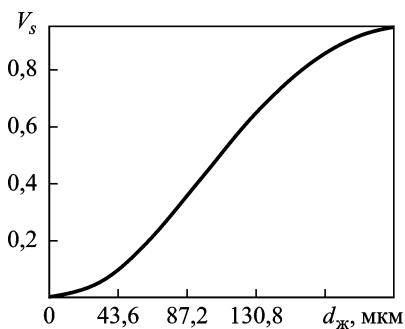


Рис. 2. Суммарное распределение капель воды по размерам

распределения капель по размерам. Типичный вид кривой приведен на рис. 2.

Далее в процессе расчета движения, прогрева и испарения капель воды в потоке их реальное непрерывное распределение по размерам заменялось гистограммой, насчитывающей 10 фракций с характерным размером d_{ji} и объемной долей $V_{ij}/V_{\Sigma j}$ в составе общей совокупности (табл. 1). При этом каждую каплю соответствующего размера d_{ji} считаем характерным представителем i -й фракции.

Таблица 1

Фракционный состав капель воды

Номер фракции, i	$d_{ж}, \text{мкм}$	Объемная доля капель i -й фракции в потоке жидкости $V_{ij}/V_{\Sigma j}$ (при $V_{\Sigma j} = V_s = 0,95$)
1	10,5	0,005
2	32,2	0,045
3	54	0,1
4	76,2	0,13
5	98	0,15
6	120	0,14
7	140,5	0,12
8	163	0,11
9	184,7	0,08
10	207,3	0,07

При описании движения капель воды используются координаты Лагранжа. Для принятого распределения среднесчетный (d_{10}), среднеповерхностный (d_{32}) и среднемассовый (d_{43}) диаметры соответственно равны 162,85, 76,92 и 114,82 мкм. Система уравнений, описывающих движение и испарение капли i -й фракции в двумерной постановке, включает в себя следующие соотношения:

$$\rho_{\text{пг}} = \frac{p_{\text{к}}}{R_{\text{пг}} T_{\text{пг}}}$$

— плотность продуктов сгорания (парагаза) — из уравнения состояния;

$$\frac{du_{\text{ж}}}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_{\text{пг}}}{\rho_{\text{ж}} d_{\text{ж}}} C_x |\vec{u} - \vec{u}_{\text{ж}}| (u - u_{\text{ж}})$$

— уравнение продольной скорости движения ($\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; $d_{\text{ж}}$ — текущий диаметр частицы рассматриваемого класса;

$C_x = \frac{24}{\sqrt{\text{Re}_ж}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления капли);

$$\frac{dv_ж}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_{пг}}{\rho_ж d_ж} C_x |\vec{u} - \vec{u}_ж| (v - v_ж)$$

– уравнение радиальной скорости движения;

$$\frac{dx_ж}{dt} = u_ж$$

– осевая составляющая траектории;

$$\frac{dr_ж}{dt} = v_ж$$

– радиальная составляющая траектории;

$$\frac{dM_ж}{dt} = -G_0$$

– изменение массы капли $M_ж$;

$$G_0 = \max\{G_{0\text{исп}}, G_{0\text{об}}\}$$

– массовый поток паров воды у поверхности капли; здесь

$$G_{0\text{исп}} = \pi d_ж^2 g_{0\text{исп}}$$

– поток за счет диффузии и конвекции,

$$G_{0\text{об}} = \frac{\pi}{6} d_ж^2 |\vec{u} - \vec{u}_ж| \sqrt{\rho_{пг} \rho_ж}$$

– поток за счет обтекания капли газовым потоком [2],

$$g_{0\text{исп}} = \frac{D_{пг} \rho_{пг}}{d_ж} \ln\left(\frac{1 - c_{\infty}}{1 - c_0}\right) \frac{\text{Sh}}{2}$$

– плотность потока массы у поверхности испаряющейся капли, где c_0 – концентрация паров воды по пограничному слою [13];

$$D_{пг} = 0,734 \left(\frac{T_{ж.ср}}{273}\right)^{1,82} \frac{10}{p_к}$$

– среднее по пограничному слою капли значение коэффициента диффузии ($T_{ж.ср}$ – средняя температура в пограничном слое капли);

$$\text{Sh} = 2 \left(1 + 0,3 \sqrt{\text{Re}_ж} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}\right)$$

– число Шервуда ($\text{Re}_ж = \frac{d_ж \rho_{пг} |\vec{u} - \vec{u}_ж|}{\mu_{пг}}$ – относительное число Рейнольдса; $\text{Sc} = \frac{v_{пг}}{D_{пг}}$ – число Шмидта; $\mu_{пг}$ – среднее по пограничному слою значение коэффициента динамической вязкости).

Изменение температуры капли определяется из решения уравнения баланса энтальпии

$$\frac{dT_{\text{ж}}}{dt} = \frac{6}{d_{\text{ж}} C_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}} (\alpha (T_{\text{пг}} - T_{\text{ж}}) - g_{0\text{исп}} Q_{\text{и}}),$$

где $Q_{\text{и}}$ и $C_{\text{ж}}$ — скрытая теплота испарения воды и удельная теплоемкость; α — коэффициент теплоотдачи.

При определении коэффициента теплоотдачи воспользуемся методикой Эл Вакила [14], в соответствии с которой вначале вычисляется значение в отсутствие массопереноса, затем последнее умножается на корректирующий коэффициент:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{пг}} \text{Nu}}{d_{\text{ж}}} \frac{Z_k}{e^{Z_k} - 1};$$

$$Z_k = \frac{-C_{p\text{пг}} \left(\frac{dM_{\text{ж}}}{dt} \right)}{\pi d_{\text{ж}} \lambda_{\text{пг}} \text{Nu}};$$

$$\text{Nu} = 2 + 0,54 \sqrt{\text{Re}_{\text{ж}}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}.$$

Расчет процессов дробления выполнялся с помощью модели Пилча и Эрдмана [15].

Система приведенных дифференциальных уравнений решалась методом Рунге–Кутты 4-го порядка.

В соответствии с приведенным алгоритмом на языке C++ была написана программа расчета характеристик испарения капель воды в условиях КС ГРД. Постановку начальных и граничных условий осуществляли, исходя из принципа минимальных видоизменений программы при моделировании различных условий эксперимента. В частности, полагали, что вектор скорости впрыска капли параллелен оси камеры двигателя, т.е. на границе подачи жидкости (поз. 3, см. рис. 1) имеем $u = u_{\text{ж}0}$, $v = v_{\text{ж}0} = 0$, $T_{\text{ж}} = T_{\text{ж}0} = 293 \text{ К}$; температура парагаза остается постоянной на входе в камеру двигателя $T_{\text{пг}0} = 3000 \text{ К}$; КС — изобарическая, с давлением $p_{\text{к}} = 9 \text{ МПа}$. Перепады давлений на форсуночной головке и радиус сопла форсунки составляют $\Delta p_{\text{ф}} = 1 \text{ МПа}$ и $r_{\text{с}} = 1 \text{ мм}$ соответственно. Основные теплофизические характеристики парагазовой смеси примем следующими: $R_{\text{пг}} = 678 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $c_{\infty} = 0,27$, $C_{p\text{пг}} = 2310 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $\nu_{\text{пг}} = 39,16 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_{\text{пг}} = 0,57 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Результаты расчета процесса движения и испарения двух видов совокупности капель: полидисперсной, состоящей из десяти фракций, и монодисперсной с характерным размером капли, равным среднемассовому диаметру, приведены в табл. 2 и 3. Сопоставление упомянутых результатов с данными табл. 1 и рис. 2 позволяет сделать вывод о существенном влиянии реального распределения капель по размерам

Результаты расчета полидисперсной смеси

Номер фракции, i	$d_{ж}$, мкм	Время испарения капель i -й фракции, мс	Длина пути испарения капель i -й фракции, мм
1	10,5	0,0486	1,4
2	32,2	0,3230	8,5
3	54	0,7621	19,2
4	76,2	1,3168	32,8
5	98	1,9799	48,5
6	120	2,7534	66,4
7	140,5	3,5371	84,7
8	163	4,4827	106,5
9	184,7	5,5254	129,2
10	207,3	6,5849	154,2

Таблица 3

Результаты расчета монодисперсной смеси

	Средний диаметр, мкм	Время испарения капель i -й фракции, мс	Длина пути испарения капель i -й фракции, мм
d_{10}	162,85	4,4990	106,4
d_{32}	76,92	1,3414	33,3
d_{43}	114,82	2,5583	62,0

на рабочий процесс, протекающий во внутреннем объеме КС ГРД, посредством времени и характерной длины испарения. При этом исключение фракций малого диаметра под номерами $i = 1$ и $i = 2$ из состава совокупности не окажет серьезного влияния на общую динамику процесса из-за их малого числа ($V_{1ж}/V_{\Sigma ж} = 0,005$; $V_{2ж}/V_{\Sigma ж} = 0,045$) и интенсивного испарения. Однако пренебрежение шестой ($i = 6$) и седьмой ($i = 7$) фракциями снижает на 27 % точность оценки времени испарения и на 25–26 % точность оценки характерной длины пути испарения.

Верификация результатов расчетов применительно к условиям эксперимента [16], приведенная на рис. 3, свидетельствует об их удовлетворительном согласовании. Некоторое отличие расчетных

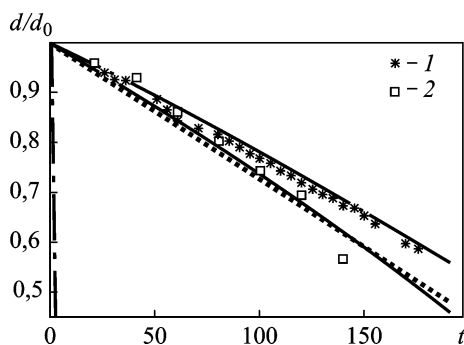


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов с данными работы [16]:

1 — эксперимент для воды при $T = 78^\circ\text{C}$, $V = 5,1$ м/с; 2 — эксперимент для воды при $T = 80,5^\circ\text{C}$, $V = 5,14$ м/с (..... — численный расчет по авторской методике; — численный расчет монодисперсной смеси с характерным размером капли d_{10})

результатов связано, вероятнее всего, с использованием приближенных полиномиальных зависимостей давления насыщенных паров, теплоемкости воды и удельной теплоты испарения от температуры, составленных для условий, отличных от условий эксперимента [16].

Приведенная в настоящей работе методика моделирования процессов движения и испарения капель воды является частью комплексной программы расчета основных характеристик рабочего процесса в объеме КС ГРД. На рис. 4 и 5 приведены примеры результатов расчета полей скорости и температуры. Анализ распределения вектора скорости несущего газа в объеме КС ГРД (см. рис. 4) позволяет сделать вывод о наличии интенсивного вихря во второй зоне, присутствие которого в целом оказывает положительное влияние на рабочий процесс, увеличивая время пребывания капель воды в камере двигателя, а значит и степень их испарения. Рассматривая температурное поле (см. рис. 5), следует отметить наличие низкотемпературных зон вблизи форсуночной головки первой и второй зон, что является благоприятным с точки зрения организации эффективной тепловой защиты элементов конструкции. Размеры упомянутых зон, как и масштаб вихря существенно изменяются (вплоть до полного исчезновения) при изменении режимных параметров рабочего процесса (давление в КС, скорость подачи компонентов топлива).

Резюмируя результаты выполненных исследований, можно заключить, что разработанная математическая модель расчета процес-

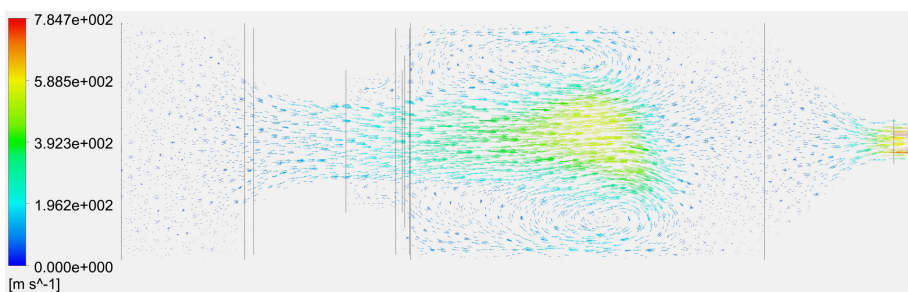


Рис. 4. Распределение вектора скорости несущего газа

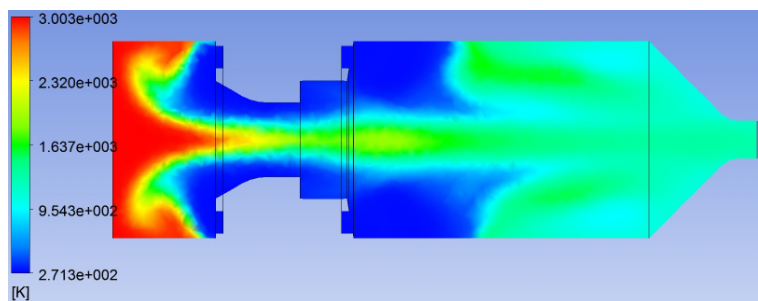


Рис. 5. Распределение температуры по объему КС ГРД

сов движения и испарения капель воды в условиях КС ГРД с учетом полидисперсного распределения капель по размерам показала свою адекватность и удовлетворительную сходимостъ с имеющимися экспериментальными данными. Внедрение изложенной методики позволит повысить точность математического моделирования рабочих процессов в КС ГРД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки / Л.С. Яновский и др. – М.: Физматлит, 2010. – 320 с.
2. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / Е.В. Лебединский, Г.П. Калмыков, С.В. Мосолов и др. / Под ред. академика РАН А.С. Коротеева. – М.: Машиностроение, 2008. – 512 с.
3. Bjorn Hussmann, Michael Pfitzner. Extended combustion model for single boron particles – Part I: Theory // *Combustion and Flame*. – 2010. – Vol. 157. – P. 803–821.
4. Bjorn Hussmann, Michael Pfitzner. Extended combustion model for single boron particles – Part II: Validation // *Combustion and Flame*. – 2010. – Vol. 157. – P. 822–833.
5. Реактивные двигатели подводных аппаратов на твердом топливе / Е.С. Шахиджанов, А.Ф. Мяндин. – М.: Изд-во ГНПП “Регион”, 2005. – 232 с.
6. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
7. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А.С. Лышевский. – М.: Машгиз, 1963. – 181 с.
8. Вивденко М. И., Шабалин К. Н. Исследование условий получения равномерных капель размером 1–0,5 мм // *Изв. вузов. Химия и хим. технолог.* – 1965. – Т. 8, № 4. – С. 685–690.
9. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, Б.И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1977.
10. Nukijama and Tanasawa J. *Transactions of the Mechanical Engineers*. – 1939. – Vol. 5. No 18.
11. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах. – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.
12. Антонюк П. Н. Распределение по размерам капель распыливаемой жидкости // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2007. – Спец. вып. – С. 46–50.
13. Щербак А. А. Расчет процессов распыла, движения и испарения жидкого компонента топлива // *Методические указания по выполнению домашнего задания по курсу “Рабочие процессы”*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. – 16 с.
14. El Wakil M. M., Ueyhara O. A., and Myers P. S. 1954. ‘A theoretical investigation of the heating-up period of injected fuel droplets vaporizing in air’, NASA Technical Note 3179.
15. Pilch M., and Erdman C. A. 1987. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop // *Int. J. Multiphase Flow*, 13(6). – P. 741–757.
16. Терехов В. И., Терехов В. В., Шишкин Н. Е., Би К. Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // *Инж.-физич. журнал*. – 2010. – Т. 83, № 5. – С. 829–836.

Статья поступила в редакцию 11.10.2011

Дмитрий Алексеевич Ягодников родился в 1961 г. Д-р техн. наук, зав. кафедрой “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 160 научных работ в области экспериментально-теоретического исследования процессов воспламенения и горения порошкообразных металлов и бесконтактной диагностики ракетных двигателей.

D.A. Yagodnikov (b. 1961) — D. Sc. (Eng.), head of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 160 publications in the field of experimental and theoretical study of processes of ignition and combustion of powder-like metals and contactless diagnostics of rocket engines.

Юрий Владимирович Антонов родился в 1985 г. Окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г. Аспирант, ассистент кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ в области рабочих процессов в тепловых энергетических установках, конверсионного использования ракетных двигателей.

Yu.V. Antonov (b. 1985) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009. Post-graduate, assistant lecturer of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of working processes in thermal power plants, conversion utilization of rocket engines.

Юрий Николаевич Власов родился в 1937 г. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области рабочих процессов в тепловых энергетических установках, конверсионного использования ракетных двигателей.

Yu.N. Vlasov (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of working processes in thermal power plants, conversion utilization of rocket engines.