

**Сравнение трех моделей течения и перемешивания  
модельных рабочих тел в смесительном элементе  
ЖРДМТ тягой 10...15 Н,  
основанных на решении осредненных по Рейнольдсу  
уравнений Навье — Стокса**

© Е.В. Семкин

АО «Научно-исследовательской институт машиностроения»,  
г. Нижняя Салда Свердловской области, 624740, Россия

*Проанализированы возможности построения в программном коде ANSYS CFX модели течения рабочих тел с перемешиванием в смесительном элементе и камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги диапазона тяг от 10 до 15 Н. Модели построены на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, написанных для трех случаев течения многофазного многокомпонентного несжимаемого потока жидкостей: двухфазной двухкомпонентной двухскоростной модели течения; двухфазной двухкомпонентной односкоростной модели течения; трехфазной трехскоростной модели течения. Рассмотрены преимущества и недостатки применения каждой из моделей. Проведено сравнение результатов моделирования с результатами измерений, выполненных при проведении гидравлических испытаний смесительных элементов. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке рекомендаций по проектированию смесительного элемента камеры двигателя.*

**Ключевые слова:** методика расчета, смеситель из двух центробежных форсунок, моделирование течения

**Введение.** При проектировании смесителей, которые применяются в камерах жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ), работающих на компонентах топлива тетраоксид диазота и несимметричный диметилгидрозин (АТ-НДМГ), одной из актуальных задач является повышение полноты перемешивания компонентов топлива в смесительном элементе за время жидкофазной индукции [1–5]. Смесительный элемент должен обеспечивать равномерное и полное перемешивание компонентов топлива до заданного массового соотношения за короткое время ( $\tau_{жф} = 1 \cdot 10^{-4}$  с) для последующего максимально полного преобразования их в продукты сгорания. В течение этого времени перемешивание компонентов топлива происходит за счет процессов механического взаимодействия, а влиянием химических реакций на рабочий процесс в камере сгорания пренебрегают. Компоненты топлива в смесителях в течение времени жидкофазной индукции перемешиваются под воздействием сил инерции, диффузионных сил, связанных с турбулентной вязкостью компонентов

топлива, сил гравитации, поверхностного натяжения, гидравлического сопротивления при движении компонентов топлива относительно газовой среды и относительно друг друга.

Оптимизация работы смесительного элемента ЖРДМТ в настоящее время проводится по результатам проектных расчетов его конструкции и десятка испытаний смесительного элемента в составе ЖРДМТ на натуральных компонентах топлива, что вызвано большими финансовыми и временными затратами. Одним из путей снижения затрат, связанных с оптимизацией конструкции смесительных элементов ЖРДМТ, является применение при проектировании цифрового аналога смесительного элемента, адекватно описывающего процессы перемешивания и течения моделируемых рабочих тел в расчетной области. Использование таких аналогов позволяет еще на этапе проектных расчетов проводить оптимизацию конструктивных параметров смесительных элементов.

В основе современных цифровых аналогов смесительного элемента ЖРДМТ могут лежать математические модели течения и перемешивания жидких рабочих тел, построенные на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса различной сложности в зависимости от постановки задач, используемых определений, упрощений и допущений этих уравнений. В этом случае выбор математической модели течения рабочих тел с перемешиванием в смесительном элементе и камере сгорания ЖРДМТ для проведения адекватного моделирования становится одной из главных задач. В литературе имеются примеры использования различных моделей течения рабочих тел в смесительных элементах и форсунках [5–8], реализованные в машинных кодах ANSYS SFX, ANSYS Fluent, FlowVision.

В настоящей статье приведен анализ возможности построения цифрового аналога смесительного элемента ЖРДМТ диапазона тяг 10...15 Н, в конструкции которого используются две центробежные форсунки, на основе различных моделей течения рабочих тел с перемешиванием в смесительном элементе и камере сгорания в программном коде ANSYS CFX. Модели построены на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса для трех случаев течения многофазного, многокомпонентного несжимаемого потока модельных жидкостей:

- двухфазной двухкомпонентной двухскоростной модели течения;
- трехфазной двухкомпонентной односкоростной модели течения;
- трехфазной трехскоростной модели течения.

В качестве модельных рабочих тел при выполнении расчетов используются вода и воздух. При проведении экспериментальных работ накоплен большой объем данных по испытаниям ЖРДМТ на натуральных компонентах топлива АТ-НДМГ и гидравлическим испытаниям

смесительного элемента камеры ЖРДМТ при сливах в атмосферу. Огневые испытания ЖРДМТ и гидравлические испытания смесительного элемента камеры ЖРДМТ проведены при одинаковых конструктивных параметрах смесительного элемента. Таким образом, существует возможность проводить сопоставление результатов огневых и гидравлических испытаний при сливах в атмосферу с результатами расчета на модельных рабочих телах вода и воздух.

В статье приведены результаты расчетов по моделям.

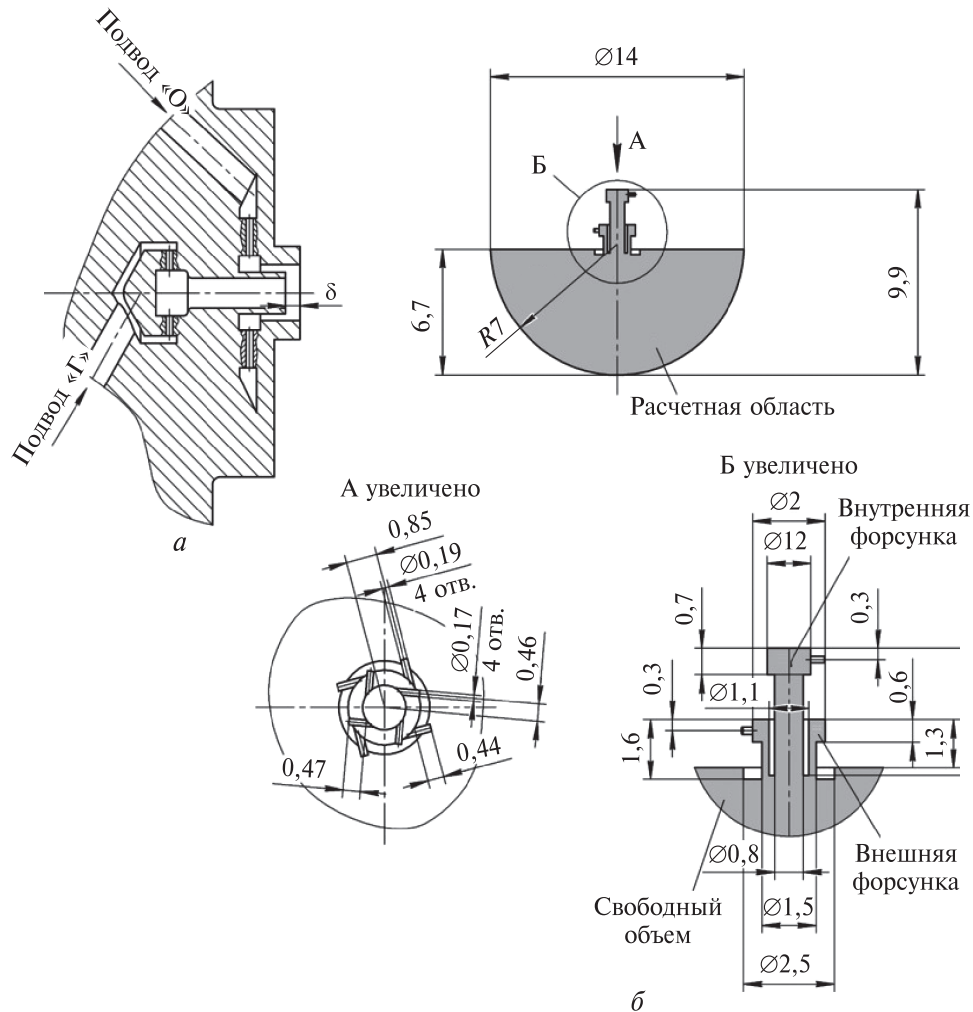
**Объект исследования.** В качестве объекта исследований принят смеситель камеры перспективного ЖРДМТ тягой 10...15 Н разработки АО «НИИМаш». Двигатель работает на компонентах топлива АТ-НДМГ. Конструктивная схема и гидравлический тракт моделируемого смесителя показаны на рис. 1. Закрутка модельных жидкостей, поступающих в расчетную область через внутреннюю и внешнюю форсунки, проводится в разные стороны. Стенки гидравлического тракта смесителя выполнены с регулярной шероховатостью 0,8 мкм.

Составляющие расчетную область границы свободного объема камеры сгорания, прилегающего к форсунке, выбирались на достаточном удалении от среза сопла внешней форсунки смесителя, чтобы пелена жидкой пленки, истекающей из смесителя, успела распасться.

В ходе экспериментальных работ с двигателем при фиксированных значениях размера  $\delta$  в диапазоне 0,05...0,55 мм проводились гидравлические испытания при расходах воды 1,85 г/с через внутреннюю форсунку и 2,54 г/с через внешнюю форсунку. Перепад давления воды при этом составлял 6,8 кгс/см<sup>2</sup> для внутренней и 6,1 кгс/см<sup>2</sup> для внешней форсунки. При гидравлических испытаниях сливы проводились в атмосферу. При указанных выше перепадах давления воды фотографированием определялись корневой угол конуса распыла и визуальная картина течения в свободном факеле. При тех же размерах  $\delta$  проводились огневые испытания ЖРДМТ на натуральных компонентах топлива, в ходе которых определялись величины удельного импульса тяги и тяги двигателя.

**Постановка задачи.** Проведенный объем экспериментальных работ и полученные данные позволяют решать задачу оптимизации конструкции смесительного элемента, показанного на рис. 1, при сопоставлении величины удельного импульса тяги, полученного при проведении огневых испытаний ЖРДМТ, и коэффициента перемешивания массы воды в расчетной области, определенного в результате численного эксперимента с цифровым аналогом смесительного элемента. Сопоставление проводят по результатам выполненных расчетов при значениях массовых расходов компонентов топлива (при огневых испытаниях) и модельной жидкости (воды), максимально приближенных к значениям, которые соответствуют номинальной тяге ЖРДМТ. Коэффициент перемешивания определяется

как отношение массы воды, поступающей в расчетную область через форсунки смесителя, к массе перемешавшейся воды за промежуток времени жидкофазной индукции  $\tau_{жф} = 1 \cdot 10^{-4}$  с при установившемся течении воды и воздуха в расчетной области.



**Рис. 1.** Конструктивная схема и геометрия расчетной области смесительного элемента ЖРДМТ тягой 10...15 Н:  
 а — конструкция двухкомпонентной форсунки; б — расчетная область

Математические модели, которые могут быть использованы для цифрового аналога смесителя, основываются на методологии представления многофазных, многокомпонентных потоков жидкостей, реализованных в программном коде ANSYS CFX. В случае использования осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса возможен выбор нескольких вариантов моделей, описывающих течение модельных рабочих тел воды и воздуха с учетом перемешивания отдельных

компонентов течения в расчетной области. Для использования в цифровом аналоге смесителя математическая модель выбирается по соответствию контролируемых параметров при гидравлических испытаниях и при проведении расчета на модельных рабочих телах вода и воздух. Контролируемыми параметрами при сливе в атмосферу являются величины массовых расходов воды через внешнюю и внутреннюю форсунки, величина корневого угла факела распыла, визуальная картина течения воды в свободном факеле распыла. Максимально полное совпадение контролируемых параметров, определенных по математической модели и по результатам гидравлических испытаний, соответствует максимальной адекватности математической модели, принятой для цифрового аналога смесителя.

Для использования в цифровом аналоге смесителя в качестве одной из возможных рассматривается трехфазная трехскоростная модель течения. Подробно данная модель описана в [6], здесь дано ее сравнение с другими методиками. Особенности постановки задачи при использовании этой модели показаны на рис. 2.

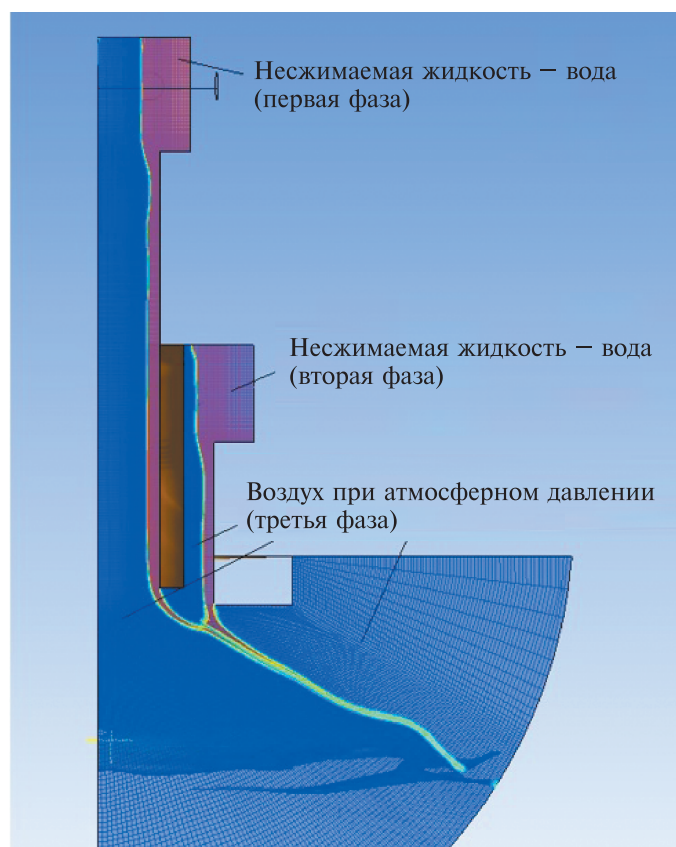


Рис. 2. Постановка задачи при использовании трехфазной трехскоростной модели течения

В модели исследуется течение трех фаз. Две фазы представляют несжимаемую жидкость — воду. Третья фаза представляет собой воздух. В процессе решения рассматривается установившаяся картина течения с разрешением взаимодействия за счет относительного движения между фазами на границе их раздела.

Для решения задачи используется модель описания течения многофазного потока [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha)) = S_{M_{buoy}} + F_{\alpha\beta} - r_\alpha \nabla p_\alpha + \\ + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)) + M_\alpha; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^3 r_\alpha \rho_\alpha; \quad (3)$$

$$\mu = \sum_{\alpha=1}^3 r_\alpha \mu_\alpha; \quad (4)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 r_\alpha = 1; \quad (5)$$

$$p_\alpha = p \text{ для всех } \alpha = 1, 2 \text{ или } 3, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — составляющие части многофазного потока, в решаемой задаче это вода, поступающая в расчетную область через внутреннюю ( $\alpha = 1$ ) и внешнюю ( $\alpha = 2$ ) форсунки, и воздух, заполняющий расчетную область на начало расчета ( $\alpha = 3$ );  $r_\alpha$  — объемная доля контрольного объема расчетной области, занятая фазой  $\alpha$ ;  $S_{M\_buoy}$  — источник импульса силы тяжести в расчетной области,

$$S_{M\_buoy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (7)$$

( $\rho$  — текущая плотность в расчетной области;  $\rho_{ref}$  — плотность жидкости в расчетной области на начало расчета, задаваемая пользователем);

$F_{\alpha\beta}$  — сила поверхностного натяжения, действующая на границе раздела фаз,

$$F_{\alpha\beta} = f_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta}. \quad (8)$$

Здесь

$$f_{\alpha\beta} = -\sigma k_{\alpha\beta} n_{\alpha\beta} + \nabla_s \sigma \quad (9)$$

( $\sigma$  — сила поверхностного натяжения воды при контакте с воздухом, на границе раздела фаз;  $k_{\alpha\beta}$  — поверхностное искривление поверхности раздела фаз, определенное как

$$k_{\alpha\beta} = \nabla \cdot n_{\alpha\beta}; \quad (10)$$

$n_{\alpha\beta}$  — вектор нормали на поверхности контакта фаз, направленный от первичной жидкости к вторичной;  $\nabla_s$  — оператор градиента по поверхности контакта фаз);

$$\delta_{\alpha\beta} = |\nabla r_{\alpha\beta}|. \quad (11)$$

При проведении решения считается, что обмен массами между фазами протекает равновесно. Член  $M_\alpha$  в уравнении (2) описывает передачу импульса в процессе взаимодействия фаз потока. В расчете  $M_\alpha$  представляется как

$$M_\alpha = M_{\alpha\beta}^D, \quad (12)$$

где  $M_{\alpha\beta}^D$  — учитывает силу сопротивления при взаимодействии двух фаз и определяется из соотношения

$$M_{\alpha\beta}^D = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} |U_\beta - U_\alpha| (U_\beta - U_\alpha), \quad (13)$$

в котором  $C_D$  — коэффициент сопротивления;  $\rho_{\alpha\beta}$  — плотность на границе раздела фаз:

$$\rho_{\alpha\beta} = r_\alpha \rho_\alpha + r_\beta \rho_\beta; \quad (14)$$

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla r_\alpha|. \quad (15)$$

В системе уравнений (1)–(6) вязкость

$$\mu_\alpha = \mu_{K_\alpha} + \mu_{T_\alpha}, \quad (16)$$

где  $\mu_{K_\alpha}$  — динамическая вязкость;  $\mu_T$  — турбулентная вязкость, которая рассчитывается по изотропной модели турбулентности SST [9].

В настоящей работе использована стандартная зависимость  $C_D$  от числа Рейнольдса вида [10]:

$$C_{D_i} = \frac{24}{Re_i} (1 + 0,15Re_i^{0,687}), \quad (17)$$

где  $Re_i$  — число Рейнольдса, рассчитанное по относительной скорости фаз потока в расчетной области,  $i = 1, 2$  или  $3$ .

Коэффициент сопротивления в формуле (17) получают отдельно для пар взаимодействующих фаз:

$\alpha = 1$  и  $\alpha = 3$  — вода, составляющая первую фазу и воздух;

$\alpha = 2$  и  $\alpha = 3$  — вода, составляющая вторую фазу и воздух;

$\alpha = 1$  и  $\alpha = 2$  — вода первой фазы и вода второй фазы.

Для первых двух пар взаимодействующих фаз число Рейнольдса в формуле (17) определялось выражением

$$Re = \frac{\Delta \vec{U} \cdot d_m}{\nu_{\text{воздух}}}, \quad (18)$$

где  $\Delta \vec{U}$  — относительная скорость воды и воздуха;  $d_m$  — характерный размер течения в паре вода — воздух;  $\nu_{\text{воздух}}$  — кинематическая вязкость воздуха.

Для третьей пары взаимодействующих фаз число Рейнольдса в формуле (17) задавалось зависимостью

$$Re = \frac{\Delta \vec{V} \cdot d_n}{\nu_{\text{воды}}}, \quad (19)$$

где  $\Delta \vec{V}$  — относительная скорость воды, составляющей первую фазу, и воды, составляющей вторую фазу;  $d_n$  — характерный размер течения в паре вода — вода;  $\nu_{\text{воды}}$  — кинематическая вязкость воды.

Уравнения (1)–(19) составляют замкнутую систему, для решения которой размеры  $d_m$  и  $d_n$  определяются подбором из условия максимально полного совпадения величин массовых расходов воды через внешнюю и внутреннюю форсунки, корневого угла факела распыла, визуальной картины течения воды в свободном факеле распыла.

Система уравнений (1)–(19) позволяет находить решение для трехфазного трехскоростного течения компонентов, составляющих многофазный поток. Задача перемешивания компонентов многофазного потока в рассматриваемом методе сводится к решению задачи определения межфазного взаимодействия на границе раздела фаз.

Односкоростная модель течения также является возможной математической моделью описания течения трехфазной среды в рас-



четной области. В этой модели течение многофазной среды характеризуется общим полем скорости и плотности. Межфазные взаимодействия протекают с настолько большой скоростью, что их воздействие не успевает сказываться на поле течения многофазной среды. В модели вместо уравнения (1) используется уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho U) = 0; \quad (20)$$

вместо уравнения (2) — уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (U \otimes U) = S_{M_{buoy}} + F_{\alpha\beta} - \nabla p_{\alpha} + \\ + \nabla \cdot \left( \mu \left( \nabla U + (\nabla U)^T \right) \right). \end{aligned} \quad (21)$$

В рассматриваемой модели уравнения (3)–(11), (20), (21) составляют замкнутую систему, при решении которой определяется поле течения трехфазного потока.

Поле течения с границами раздела фаз и перемешиванием компонентов в односкоростной трехфазной модели потока формируется за счет сил давления, поверхностного натяжения, гравитационных сил и сил вязкого трения. Действием остальных сил пренебрегают.

Третьей моделью, исследуемой в настоящей работе, является двухфазная двухкомпонентная модель течения. На рис. 3 показаны особенности постановки задачи при использовании этой модели.

В решение вводится двухкомпонентная жидкая смесь, компоненты которой могут перемешиваться друг с другом, изменяя свою массовую концентрацию от 0 до 1. Оба компонента смеси представляют собой воду. Двухфазный поток в расчетной области состоит из жидкой смеси — первой фазы течения и воздуха — второй фазы течения.

В расчетную область жидкая смесь вводится таким образом, что

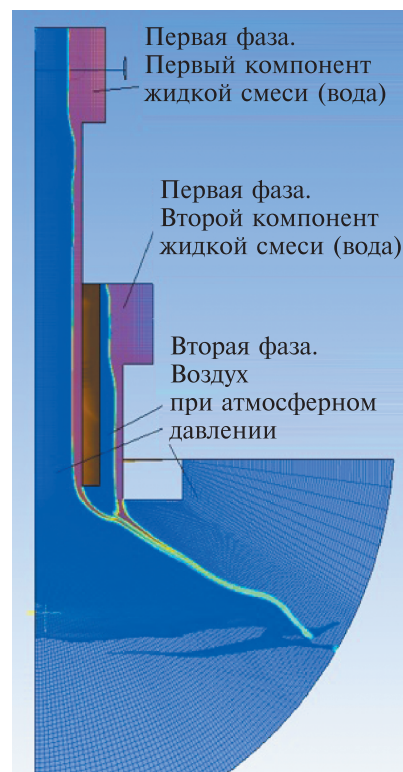


Рис. 3. Постановка задачи при использовании двухфазной двухкомпонентной модели течения

первый компонент смеси поступает через внутреннюю форсунку смесителя, а второй — через внешнюю форсунку. Распространяясь по расчетной области, жидкая смесь и воздух формируют поверхность раздела фаз, а в жидкой смеси происходит перемешивание двух компонентов смеси между собой.

Систему сохранения в этой модели составляют уравнения (1)–(18). Дополнительно к ним вводится уравнение сохранения массовой концентрации:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha Y_{A\alpha}) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha Y_{A\alpha} - \rho_\alpha D_{A\alpha} \nabla(Y_{A\alpha}))) = 0, \quad (22)$$

где  $Y_{A\alpha}$  — массовая концентрация компонента смеси А в фазе  $\alpha$ ;  $D_{A\alpha}$  — коэффициент диффузии компонента смеси А в фазе  $\alpha$ .

Соответственно

$$D_{A\alpha} = \frac{\vartheta_{A\alpha}}{\rho_A} + \frac{\mu_m}{\text{Sct}}, \quad (23)$$

где  $\vartheta_{A\alpha}$  — динамическая вязкость;  $\text{Sct} = 520$  — турбулентное число Шмидта.

В процессе решения систем уравнений (1)–(18), (22), (23) разрешаются поверхности раздела фаз жидкой смеси и воздуха, взаимодействие фаз на границе их раздела вследствие относительного движения фаз относительно друг друга, перемешивание двух компонентов жидкой смеси. Входящая в систему уравнений величина  $d_m$  определяется подбором из условия максимально полного совпадения величин массовых расходов компонентов смеси через внешнюю и внутреннюю форсунки, корневого угла факела распыла, визуальной картины течения воды в свободном факеле распыла.

**Расчетная сетка.** В расчетной области была сконструирована специальная расчетная сетка [5] с количеством узлов примерно 10 000 000. Расчет проводили в лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ. Кроме того, использовалась расчетная сетка с меньшим количеством узлов (около 1 400 000) для проведения расчетов на домашнем компьютере.

**Результаты расчета.** На рис. 4 приведены результаты расчета распыла воды смесителем по односкоростной трехфазной модели, на рис. 5–8 — по трехфазной трехскоростной модели при фиксированном значении  $d_m = 50$  мкм и значении  $d_n$  от 10 мм до 5 м (формулы (18) и (19)). Структуры течения у корня факела распыла и на выходе из гидравлического тракта показаны на рис. 4–8, а; структуры свободного факела распыла в объеме расчетной области, прилегающей к смесителю, — на рис. 4–8, б.

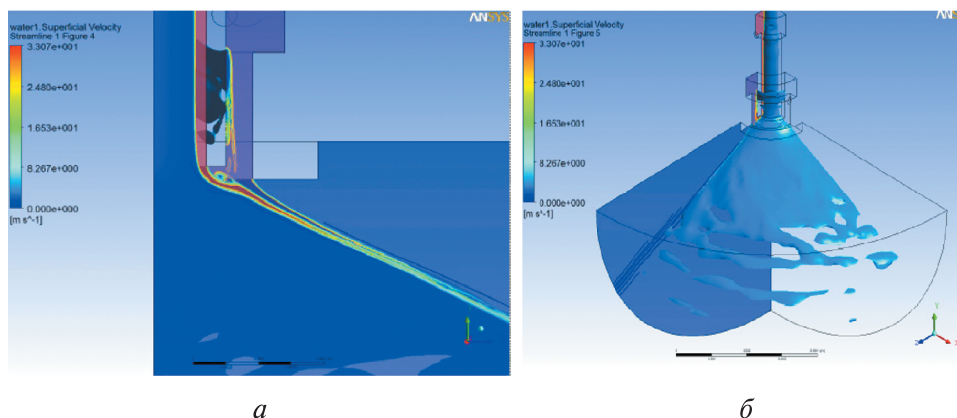


Рис. 4. Трехфазная односкоростная модель решения на момент времени  $\Delta t = 36,87$  мс от начала расчета. Объемная доля воды 0,1

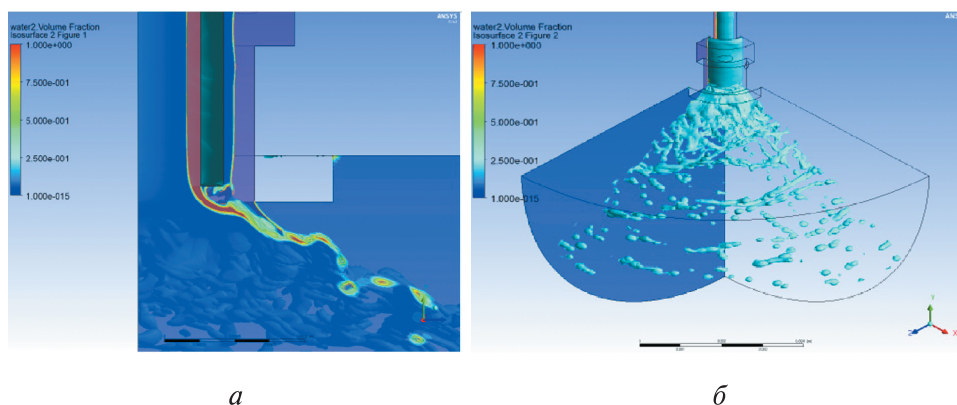


Рис. 5. Трехфазная трехскоростная модель течения. Решение на момент времени  $\Delta t = 50,0$  мс от начала расчета,  $d_m = 50$  мкм,  $d_n = 5$  м. Объемная доля воды 0,2

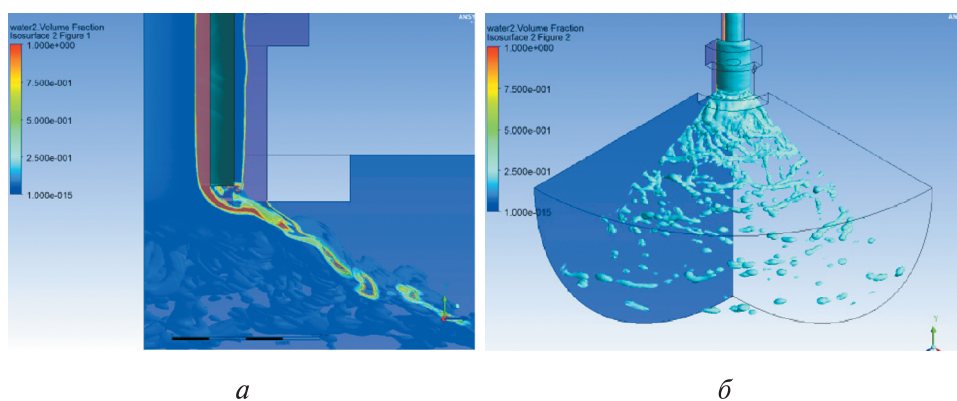
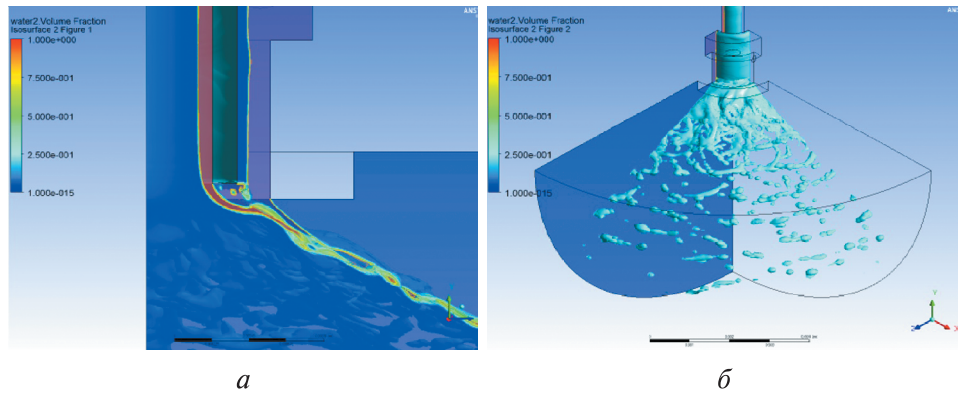
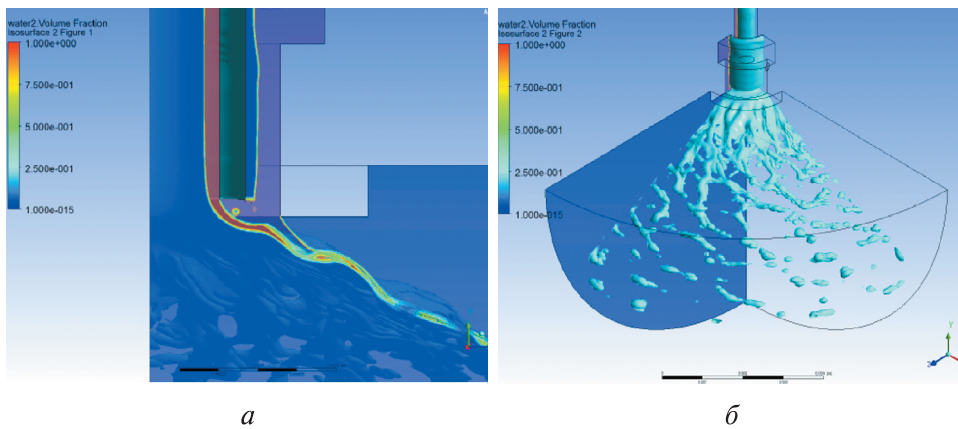


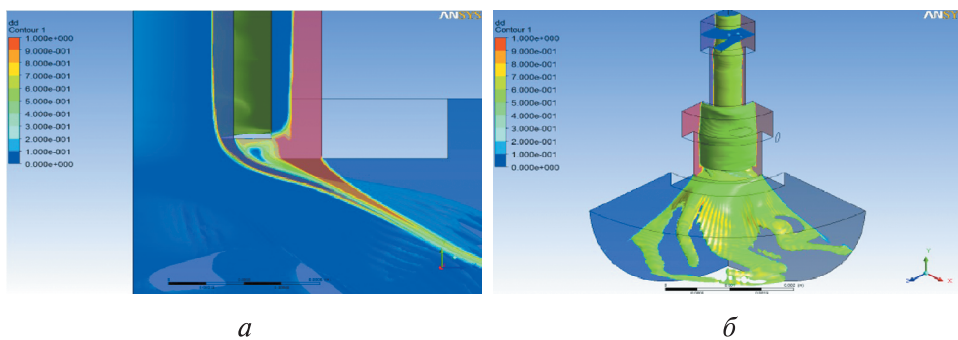
Рис. 6. Трехфазная трехскоростная модель течения. Решение на момент времени  $\Delta t = 50,0$  мс от начала расчета,  $d_m = 50$  мкм,  $d_n = 1$  м. Объемная доля воды 0,2



**Рис. 7.** Трехфазная трехскоростная модель течения. Решение на момент времени  $\Delta t = 50,0$  мс от начала расчета,  $d_m = 50$  мкм,  $d_n = 100$  мм. Объемная доля воды 0,2



**Рис. 8.** Трехфазная трехскоростная модель течения. Решение на момент времени  $\Delta t = 46,0$  мс от начала расчета,  $d_m = 50$  мкм,  $d_n = 10$  мм. Объемная доля воды 0,2



**Рис. 9.** Двухфазная двухкомпонентная модель течения. Решение на момент времени  $\Delta t = 23,0$  мс от начала расчета,  $d_m = 100$  мкм, турбулентное число Шмидта 520,0: *a* — структура течения у корня факела распыла и на выходе из гидравлического тракта; *б* — структура свободного факела распыла в объеме расчетной области, прилегающей к смесителю. Произведение объемной доли воды на массовую концентрацию составляет 0,3

Результаты расчетов распыла воды смесителем по двухфазной двухкомпонентной модели при значении  $d_n$  100 мкм (формула (19)) приведены на рис. 9.

Изменение объемной доли воды (см. рис. 5–8, *a*) и изменение произведения объемной доли воды на массовую концентрацию компонентов жидкой смеси, поступающей через внешнюю и внутреннюю форсунки смесителя (рис. 9, *a*), поставлено в соответствие с изменением цвета на этих рисунках. Зеленый цвет в факеле распыла смесителя свидетельствует о том, что в данной точке расчетной области находится половина объемной или массовой доли воды, поступившей из внутренней и внешней форсунок, т. е. произошло полное перемешивание.

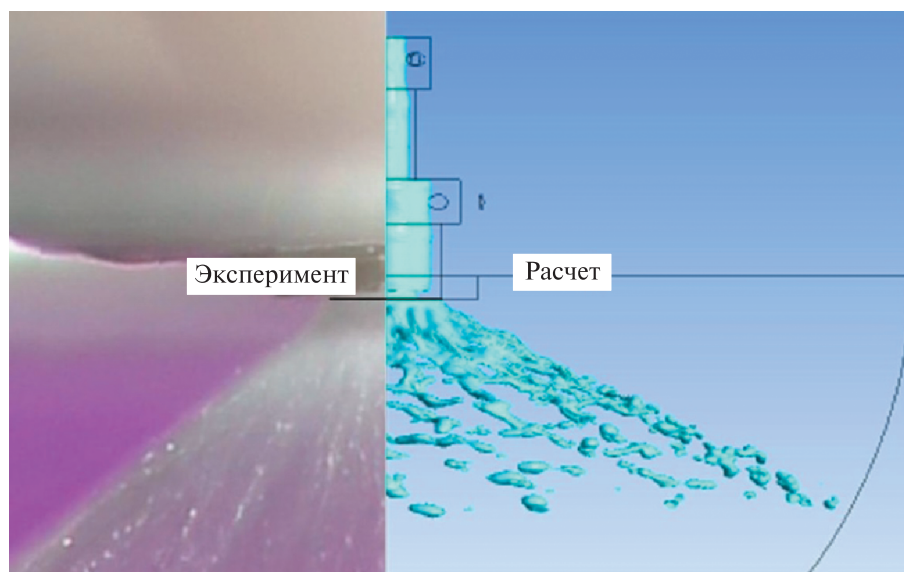
Значения расходов воды через внешнюю и внутреннюю форсунки, установившихся в процессе расчетов (см. рис. 5–9), приведены в таблице.

**Значения расходов воды через внешнюю и внутреннюю форсунки**

Номер рисунка	$\dot{G}^{\text{внутр}}$ , г/с	$\dot{G}^{\text{внеш}}$ , г/с	Точность, %	
			Внутренняя форсунка	Внешняя форсунка
5	1,810	2,641	2,2	3,9
6	1,799	2,661	2,8	4,8
7	1,796	2,656	2,9	4,6
8	1,820	2,685	1,6	5,7
9	1,796	2,649	2,9	4,3

Обозначения:  $\dot{G}^{\text{внутр}}$  — секундный массовый расход воды через внутреннюю форсунку смесителя;  $\dot{G}^{\text{внеш}}$  — секундный массовый расход воды через внешнюю форсунку смесителя.

**Анализ результатов расчетов.** Согласно представленным на рис. 4 данным, зона смешения воды, рассчитанная по односкоростной трехфазной модели, развивается с малой интенсивностью (см. рис. 4, *a*). Зона перемешивания и начало распада пленочного течения в свободном факеле распыла удалены от среза сопла внешней форсунки смесителя на некоторое расстояние. Сравнение визуальных картин течения в свободном факеле распыла, полученных при расчете и гидравлических испытаниях (см. рис. 4, *б*; рис. 10), показывает, что расчетная картина течения не соответствует тому, что было получено при гидравлических испытаниях. По-видимому, силы, учитываемые в односкоростной трехфазной модели при формировании факела распыла и зоны смешения, не позволяют описывать процессы при смешении и течении в реальном факеле распыла с необходимой точностью.



**Рис. 10.** Результаты расчета и фотографирования при гидравлических испытаниях. Объемная доля воды 0,2

Применение трехфазной трехскоростной модели при проведении расчета дает возможность рассчитывать развитие слоя перемешивания при воздействии большего количества сил, чем в односкоростной трехфазной модели. По данным, представленным на рис. 5–8, можно сделать вывод о том, что изменение параметра  $d_n$  позволяет эффективно управлять слоем смешения и картиной свободного факела распыла. Изменение параметра  $d_n$  от 5 м до 10 мм приводит к изменениям в структуре течения у корня факела распыла и на выходе из гидравлического тракта смесителя, изменяется и картина распыла свободного факела. С уменьшением  $d_n$  при фиксированном  $d_m$ , равном 50 мкм, в зону смешения воды вовлекается все меньший объем жидкости (см. рис. 5–8, а). Зоны смешения воды внешней и внутренней форсунок на рис. 5–8, а имеют малые размеры и более высокую интенсивность перемешивания, чем на рис. 4, а. Когда  $d_n$  изменяется в вышеуказанном диапазоне, вслед за изменениями в слое смешения воды изменяется и визуальная картина течения в свободном факеле распыла, прилегающем к соплу внешней форсунки смесителя (рис. 5–8, б).

Применение двухфазной, двухкомпонентной модели для проведения расчетов (см. рис. 9, а) позволяет получать зону перемешивания, интенсивно развивающуюся от места слипания жидкости между соплами внешней и внутренней форсунок на выходе из смесителя и далее вниз по потоку в свободном факеле распыла. Картина свобод-



ного факела распыла, полученная в расчете по этой модели (см. рис. 9, б) показывает, что пленочное течение из смесителя быстро распадается. Вместе с тем необходимо отметить, что картина течения, полученная расчетом с использованием этой модели, еще далека от картины течения в свободном факеле распыла, полученном при гидравлических испытаниях (см. рис. 10). Расчеты с использованием двухкомпонентной двухфазной модели только начались, и требуется продолжить исследования при изменении параметра  $d_m$  в широком диапазоне значений.

Результаты расчета, наиболее близкие к картине течения в гидравлических испытаниях, получены при применении трехфазной трехскоростной модели и значениях параметров  $d_m = 50$  мкм и  $d_n = 10$  мм, входящих в формулы (18) и (19). На рис. 10 отражены для сравнения результаты расчета и фотографии процесса гидравлических испытаний при сливе в атмосферу.

Массовые расходы воды через внутреннюю и внешнюю форсунки смесителя, установившиеся в процессе расчета (см. таблицу), с удовлетворительной точностью совпадают с результатами измерений массовых расходов в ходе гидравлических испытаний.

**Заключение.** Применение односкоростной трехфазной модели течения не позволяет получить адекватной эксперименту картины развития слоя смешения воды в свободном факеле распыла.

В случае применения трехфазной трехскоростной модели расчета смесителя путем подбора параметров  $d_m$ ,  $d_n$  удается получать картины течения в свободном факеле распыла смесителя близкие к той, которая получена при эксперименте.

Необходимо продолжить численный эксперимент по использованию двухкомпонентной двухскоростной модели для получения картины течения свободного факела распыла, близкой к результатам эксперимента.

При применении трехфазной трехскоростной модели путем подбора значений  $d_m = 50$  мкм и  $d_n = 10$  мм получено хорошее совпадение расчетной картины течения с результатами гидравлических испытаний.

Результаты расчета могут быть использованы при разработке рекомендаций по проектированию смесительного элемента камеры ЖРДМТ тягой от 10 до 15 Н после выбора математической модели для цифрового аналога, обеспечивающей максимально точное соответствие контролируемых параметров при гидравлических испытаниях и при проведении расчета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андреев Ю.З. *Исследование зависимостей характеристик ЖРДМТ тягой 50...400 Н на топливе АТ+НДМГ от основных параметров двухкомпонентной сосной центробежной форсунки и струйных форсунок завесы: дис. ... канд. техн. наук.* Нижняя Салда, 2004, 181 с.
- [2] Градов В.Н. *Исследование внутрикамерных рабочих процессов в ЖРДМТ с целью повышения их экономичности: дис. ... канд. техн. наук.* Куйбышев, 1974.
- [3] Царапкин В.С. *Особенности процесса преобразования жидкого ракетного топлива НДМГ+N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> в камерах ЖРДМТ: автореф. дис. ... канд. техн. наук.* Ленинград, 1982, 18 с.
- [4] Нигодюк В.Е., Годлевский В.Е., Шустов С.А. и др. *Исследование структуры потерь удельного импульса давления в камере сгорания ЖРДМТ тягой 100Н. Отчет Куйбышевского авиационного института (КуАИ) № 338.* Куйбышев, 1976, 108 с.
- [5] Семкин Е.В. Исследование процессов истечения жидкости из малорасходных центробежных форсунок жидкостного ракетного двигателя малой тяги. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2016, т. 15, № 4, с 150–161.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-150-161
- [6] Семкин Е.В. Методика моделирования процесса течения жидкости в смесителе, состоящем из двух малорасходных центробежных форсунок. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2018, т. 17, № 4, с. 141–154.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154
- [7] Туманова Е. Использование САЕ системы FlowVision для исследования взаимодействия потоков жидкости в центробежно-струйной форсунке. *Журнал САПР и графика*, 2005, сентябрь, с. 2–6.
- [8] Сербин С.И., Вилкул С.В. Моделирование процесса распыливания жидкого топлива центробежной форсункой. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2008, № 7 (54), с. 95–98.
- [9] *ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory.* ANSYS Europe Ltd, 2005, 266 p.
- [10] Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. *Многофазные течения газа с частицами.* Москва, Машиностроение, 1994, 320 с. ISBN 5-217-01797-X

Статья поступила в редакцию 01.12.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Семкин Е.В. Сравнение трех моделей течения и перемешивания модельных рабочих тел в смесительном элементе ЖРДМТ тягой 10...15 Н, основанных на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-2-2057>

**Семкин Евгений Владимирович** — начальник группы конструкторского отдела ФГУП «НИИМаш». Область научных интересов: исследования физико-химических процессов перемешивания компонентов топлива и их преобразования в продукты сгорания в жидкостных ракетных двигателях малой тяги.  
e-mail: [sewa20-68@rambler.ru](mailto:sewa20-68@rambler.ru), [niimash@list.ru](mailto:niimash@list.ru)



## **Simulating working bodies in the mixer of a low-thrust liquid propellant rocket engine with a thrust of 10 to 15 N: comparing three models of flow and mixing based on solving Reynolds-averaged Navier — Stokes equations**

© E.V. Semkin

Stock Company Research & Development Institute of Mechanical Engineering,  
Nizhnyaya Salda, Sverdlovsk Oblast, 624740, Russia

*The paper analyses the possibilities of using the ANSYS CFX hydrocode to simulate the flow and mixing of working bodies in the mixer and combustion chamber of a low-thrust liquid propellant rocket engine in the thrust range of 10 to 15 N. We built our models around solving Reynolds-averaged Navier — Stokes equations stated for three types of multiphase multicomponent incompressible fluid flow: a two-phase two-component two-velocity flow model; a two-phase two-component single-velocity flow model; a three-phase three-velocity flow model. We consider the advantages and disadvantages of each model. We compare our simulation results to the results of measurements conducted during hydraulic testing of mixers.*

**Keywords:** *computational method, mixer comprising two centrifugal injectors, flow simulation*

### REFERENCES

- [1] Andreev Yu.Z. *Issledovanie zavisimostey kharakteristik ZhRDMT tyagoy 50...400 N na toplive AT+NDMG ot osnovnykh parametrov dvukhkompomentnoy soosnoy tsentrobezhnoy forsunki i struynykh forsunok zavesy. Diss. kand. tekhn. nauk* [Investigating how the properties of low-thrust liquid propellant rocket engines with a thrust of 50 to 400 N using NTO+UDMH fuel depend on the main parameters of a coaxial bicentrifugal injector and spray injectors of the cooling curtain. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Nizhnyaya Salda, 2004, 181 p.
- [2] Gradov V.N. *Issledovanie vnutrikamernykh rabochikh protsessov v ZhRDMT s tselyu povysheniya ikh ekonomichnosti. Diss. kand. tekhn. nauk* [Investigating work cycles in combustion chambers of low-thrust liquid propellant rocket engines in order to improve their efficiency. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Kuybyshev, 1974.
- [3] Tsarapkin V.S. *Osobennosti protsessa preobrazovaniya zhidkogo raketnogo topliva NDMG+N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> v kamerakh ZhRDMT. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Transformation specifics of UDMH+N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> liquid rocket propellant in combustion chambers of low-thrust liquid propellant rocket engines. Autoref. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Leningrad, 1982, 18 p.
- [4] Nigodyuk V.E., Godlevskiy V.E., Shustov S.A., et al. *Issledovanie struktury poter udelnogo impulsa davleniya v kamere sgoraniya ZhRDMT tyagoy 100N* [Investigating the structure of specific pressure impulse losses in the combustion chamber of low-thrust liquid propellant rocket engine with a thrust of 100 N]. *Otchet Kuybyshevskogo aviatsionnogo instituta (KuAI)* [Proc. of Kuybyshev Aviation Institute]. Kuybyshev, 1976, no. 338, 108 p.
- [5] Semkin E.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 150–161.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-150-161

- [6] Semkin E.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie — Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 141–154.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154
- [7] Tumanova E. *Zhurnal SAPR i grafika (Journal of CAD and graphics)*, 2005, no. 9, pp. 2–6.
- [8] Serbin S.I., Vilkul S.V. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace technic and technology*, 2008, no. 7 (54), pp. 95–98.
- [9] *ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory*. ANSYS Europe Ltd., 2005, 266 p.
- [10] Sternin L.E., Shrayber A.A. *Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase gas flows with particles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994, 320 p.

**Semkin E.V.**, Head of Group, Department of Design, Stock Company Research & Development Institute of Mechanical Engineering, Nizhnyaya Salda. Specialises in investigating the physics and chemistry behind fuel component mixing and their transformation into combustion products in low-thrust liquid propellant rocket engines.  
e-mail: sewa20-68@rambler.ru, niimash@list.ru