

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621-454.2-181.4.022.2

doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-51-60

Результаты численного моделирования двухфазного течения жидкость/газ при постоянных и реальных теплофизических свойствах жидкости в ударно-струйной форсунке

А.Д. Хлопов¹, М.С. Французов^{1,2}¹ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»² МГТУ им. Н.Э. Баумана

The Results of Numerical Simulation of Two-Phase Liquid-Gas Flow with Constant and Real Thermodynamics Properties of the Liquid in a Shock-Jet Nozzle

A.D. Khlopov¹, M.C. Frantsuzov^{1,2}¹ Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM² Bauman Moscow State Technical University

Исследовано истечение жидкости в спутном воздушном потоке из ударно-струйной форсунки с использованием коммерческого программного комплекса с варьированием начальных и граничных условий. Получены газодинамические характеристики и поля давления, скорости, температуры и объемной доли двухфазного потока. Установлено влияние теплофизических свойств жидкости на процесс распада струи ударно-струйной форсунки. Проведено сравнение результатов численного моделирования задачи истечения жидкости из ударно-струйной форсунки при постоянных и реальных (зависящих от температуры) теплофизических свойствах жидкой фазы. Определено качественное и количественное влияние входного давления жидкости в форсунке на процесс дробления струи. В результате серии расчетов выявлены минимально необходимый шаг по времени и размеры расчетной сетки для корректного решения данной задачи. Выяснено, что при реальных теплофизических свойствах объемное содержание жидкой фазы больше, чем при постоянных.

Ключевые слова: ударно-струйная форсунка, двухфазное течение, численное моделирование, реальные теплофизические свойства

In this paper, the outflow of liquid in the coflowing airstream from a shock-jet nozzle is examined using a commercial software package with varying initial and boundary conditions. Gas-dynamic characteristics and distribution fields for pressure, velocity, temperature and volume fraction of the two-phase flow are obtained. The influence of

thermophysical properties of the liquid on the process of jet dispersion is determined. The results of simulation of the liquid outflow from the shock-jet nozzle at constant and real (temperature dependent) thermophysical properties of the liquid phase are compared. The qualitative and quantitative influence of the input pressure in the nozzle on the jet dispersion process is determined. As a result of a series of calculations, the minimum required characteristics of temporal and spatial resolution for the correct solution of the problem are identified. It is established that the volume content of the liquid phase is higher with real thermophysical properties compared to the constant ones.

Keywords: shock-jet nozzle, two-phase flow, numerical simulation, real thermodynamic properties

Ударно-струйная форсунка (УСФ) является разновидностью струйной форсунки, используемой в энергетическом машиностроении для смесеобразования. Вытекающая из УСФ жидкость под действием перепада давления распадается на капли вследствие удара струи о расположенный напротив сопла отражательный элемент — препятствие. В зависимости от конструкции отражателя образуется струя в виде одиночного полого конуса или нескольких вставленных друг в друга конусов. Одним из важнейших параметров форсунок является размер капель, который в данной работе оценен по относительной величине — объемной доле жидкой фазы (ЖФ).

Корректное моделирование процессов распада и дробления струи будет способствовать более точному определению интегральных характеристик смесеобразования. Многофазные течения отличаются от однофазных гораздо более сложной физикой. Даже в круглой трубе возможны существенно различающиеся режимы двухфазного течения: пузырьковый, снарядный, пенный, капельно-кольцевой и капельный.

На сегодняшний день многофазные течения исследованы не так хорошо, как однофазные, поэтому необходимо уметь описывать их математически. Скоростное и температурное отставание (т. е. различие полей скорости и температуры между фазами) — одна из важнейших особенностей гетерофазных течений, для которой необходимо иметь математические и достаточно достоверные физические модели.

Интерес к исследованию гидрогазодинамических процессов в УСФ прослеживается в разных отраслях промышленности. В работе [1] выполнено численное моделирование течения в полости струйной форсунки, рассмотрены гидрогазодинамические характеристики двухфазного течения при различных значениях расхо-

да, определены оптимальные геометрические параметры УСФ.

Также численное моделирование двухфазных сред описано в статье [2], где особое внимание уделено сеточной сходимости и показано, что избыточное уплотнение расчетной сетки слабо влияет на результаты расчета.

В данной работе проведено расчетное исследование двухфазного течения ЖФ и газообразной фазы (ГФ) на экспериментальном стенде УСФ, используемой в теплообменных системах и аппаратах различных отраслей промышленности. Вещество ЖФ — вода, ГФ — воздух. Для разных начальных условий истечения из УСФ выполнена серия расчетов с помощью программного модуля CFD (Computational Fluid Dynamics), в ходе которых определены газодинамические параметры гетерофазного спутного течения при постоянных теплофизических свойствах газа и жидкости, а также при реальных свойствах ЖФ [3], таких как теплопроводность, динамическая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения. К процессу распыла предъявлялись требования по минимизации расхода двухфазного потока (ДФП) и размера капель.

На рис. 1–3 приведены полученные по данным работы [3] полиномиальные зависимости теплофизических свойств воды — динамической вязкости, теплопроводности и поверхностного натяжения — от ее температуры в диапазоне давлений 0,1...4,0 МПа.

Как видно из рис. 1–3, при росте температуры воды от 0 до 100 °С ее теплофизические свойства изменяются следующим образом: динамическая вязкость снижается на 84 % (см. рис. 1), теплопроводность увеличивается на 16,4 % (см. рис. 2), поверхностное натяжение уменьшается на 22 % (см. рис. 3).

Графики, приведенные на рис. 1–3, иллюстрируют существенное изменение теплофизи-

ческих свойств в зависимости от температуры, что позволяет судить о том, что с ее повышением реальные теплофизические свойства существенно влияют на структуру ДФП и на состояние жидкой струи. В частности, при сни-

жении динамической вязкости воды увеличивается влияние сил турбулизации потока, а при уменьшении коэффициента поверхностного натяжения уменьшаются капиллярные силы, что приводит к дроблению струи.

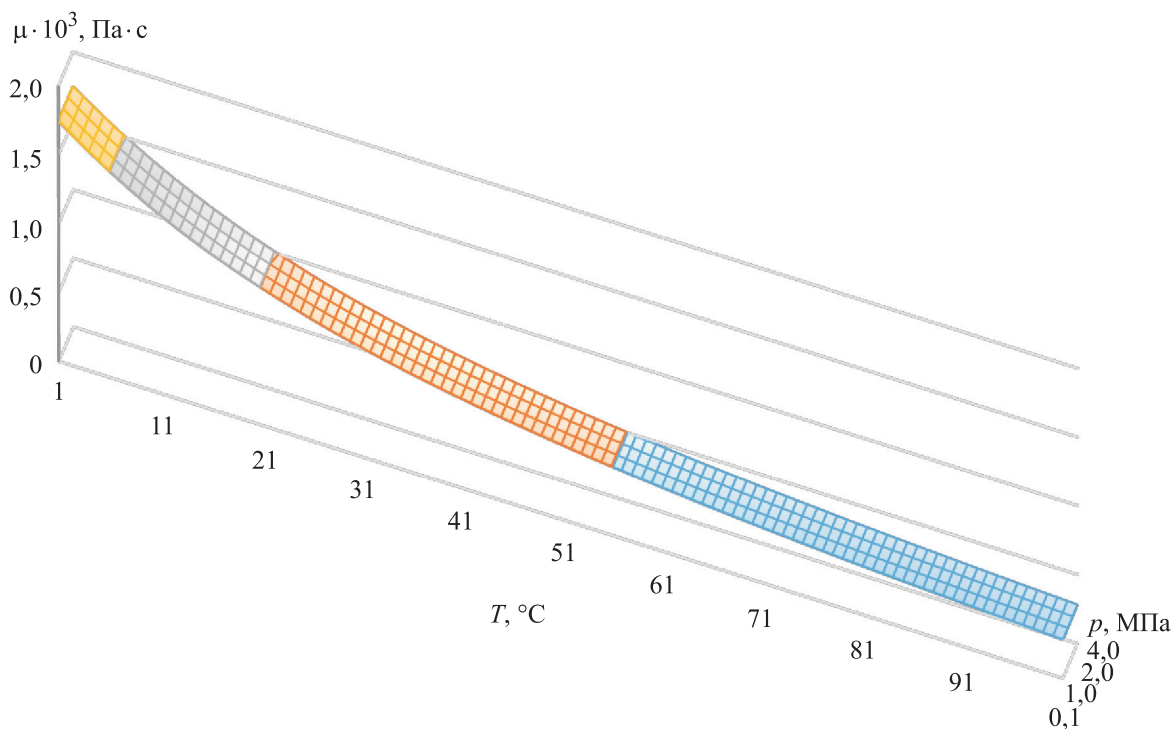


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости μ воды от ее температуры T при давлении $p = 0,1 \dots 4,0$ МПа:
■ — $\mu = 0 \dots 0,0005$; ■ — $\mu = 0,0005 \dots 0,0010$; ■ — $\mu = 0,0010 \dots 0,0015$; ■ — $\mu = 0,0015 \dots 0,0020$

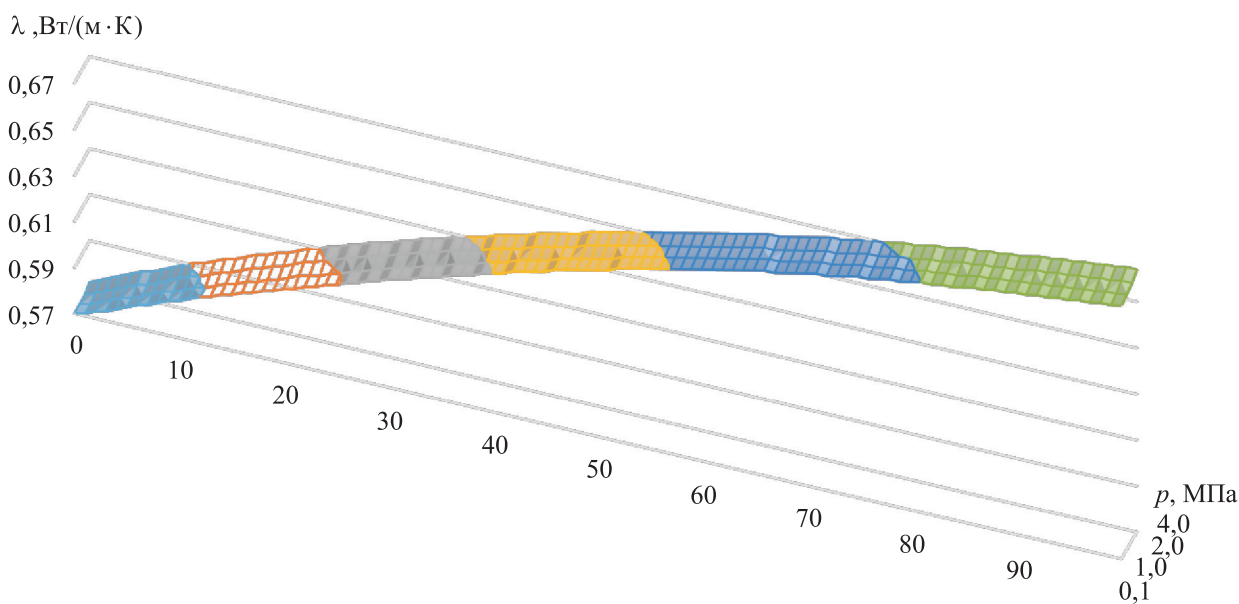


Рис. 2. Зависимость теплопроводности λ воды от ее температуры T при давлении $p = 0,1 \dots 4,0$ МПа:
■ — $\lambda = 0,57 \dots 0,59$; ■ — $\lambda = 0,59 \dots 0,61$; ■ — $\lambda = 0,61 \dots 0,63$; ■ — $\lambda = 0,63 \dots 0,65$;
■ — $\lambda = 0,65 \dots 0,67$; ■ — $\lambda = 0,670 \dots 0,685$

Температура капель изменяется по закону

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left(\int_V \alpha_{pi} \rho_p C_{part} T_{pi} dV \right)}{\partial t} = \\ & = - \int_S \alpha_{pi} \rho_p C_{part} T_{pi} (w_{pi} n) dS + \dots + \\ & + \int_V (\alpha_{pi} \rho_p Q_{pi} + \Delta Q_i) dV, \quad i = 1, \dots, N, \end{aligned}$$

где

$$\int_V (...)$$

— интеграл по объему V , ограниченному поверхностью S ;

$$\int_S (...)$$

— интеграл по поверхности S ; α_{pi} — коэффициент теплоотдачи материала капли; ρ_p и C_{part} — плотность и теплоемкость вещества капли; T_{pi} и w_{pi} — температура и скорость капли; n — внешняя нормаль к поверхности S ; Q_{pi} — тепловой поток между газом и каплями; ΔQ_i — теплообмен в результате столкновений капель.

Согласно этому закону, в объеме, ограниченном поверхностью S , происходит осреднение температуры капель. Процессы внутри капли не учитываются: *капля полагается однородной*. В работе [4] отмечено, что тепловое взаимодействие фаз влияет на параметры течения в соплах значительно слабее, чем аэродинамическое сопротивление, столкновения и пленка. Поэтому более детальная информация о межфазном теплообмене и теплообмене внутри фазы не учитывается.

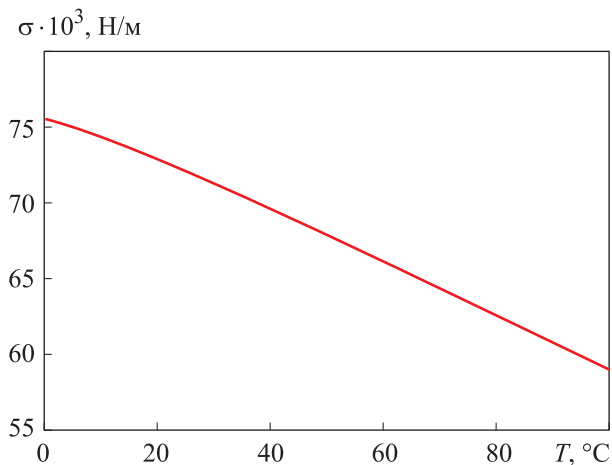


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения воды σ от ее температуры T при давлении $p = 2$ МПа

В качестве основной силы взаимодействия между газом и каплями рассмотрена сила аэродинамического сопротивления [4]. Для сферы в равномерном потоке газа эта сила вычисляется по формуле

$$F_{\text{сопр}} = \frac{3(w_g - w_p)|w_g - w_p|Cd_0\rho_g}{4\rho_p D_p}$$

Здесь w_g — скорость газа; Cd_0 — коэффициент; ρ_g — плотность газа; D_p — диаметр капли.

Коэффициент определяется выражением

$$Cd_0 = \frac{24}{Re_p} + \frac{4,4}{Re_p^{0,5}} + 0,32,$$

где Re_p — относительное число Рейнольдса для капель.

Цель работы — получение газодинамических характеристик и полей газодинамических параметров для гетерофазного течения в области УСФ, а также исследование влияния реальных термодинамических свойств ЖФ на процесс разбиения струи в двухфазном течении жидкость/газ.

Метод моделирования ДФП выбирали из двух подходов к описанию его течения — эйлера и лагранжева, на базе которых построено множество моделей. В случае лагранжевой модели DPM (Discrete Phase Model) рассчитывается траектория частиц дисперсной фазы в сплошной фазе на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений движения [5]. Для стратифицированного течения потока (с протяженной границей раздела фаз) больше подходит VoF-метод, при котором описывается взаимодействие двух фаз между собой [6]. Поэтому для прогнозирования динамики распада струи жидкости была выбрана модель VoF.

Описание геометрической модели УСФ. Геометрическая модель УСФ (рис. 4) состоит из камеры 1 для подачи жидкости с соплом, диффузора подачи воздуха 2 размером 3×6 мм и камеры смешения 3, в которой происходит столкновение обеих фаз и отражателя 4. Камера 1 представляет собой цилиндрическую трубку длиной 5 мм и диаметром 3 мм с конфузором (длиной 2,72 мм и диаметром критического сечения 0,7 мм), а камера 3 — осесимметричный канал длиной 25 мм и диаметром 6 мм.

Таким образом, геометрическая модель имеет габаритные размеры 36,4×6 мм. Задача решена в осесимметричной двумерной постановке. Геометрия выбрана из соображения наиболь-



Рис. 4. Геометрическая модель УСФ

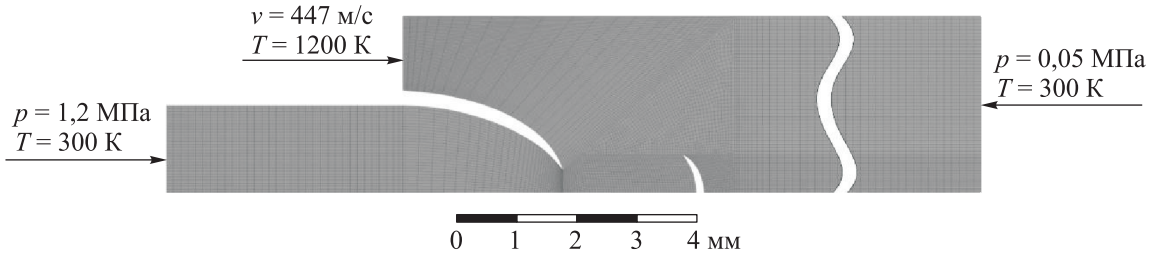


Рис. 5. Структурированная расчетная сетка с уплотнением в зоне смешения фаз и обозначением граничных условий (v — скорость ДФП)

шей степени диспергируемости жидкой струи в потоке.

На рис. 5 показана структурированная расчетная сетка с уплотнением в зоне смешения фаз, построенная для более точного определения характера взаимодействия жидкости и газа. Минимальный размер элемента — $5 \cdot 10^{-3}$ мм, максимальный — 0,5 мм, общее число элементов — 22 637.

Для определения размеров и количества элементов расчетной сетки выполнено исследование сеточной сходимости, показавшее, что существенных изменений в картине течения потока с последующим измельчением расчетной сетки не происходит. Поэтому вычисления проводили на сетке с минимальным количеством элементов для увеличения скорости их сходимости расчетов.

В ходе исследования сеточной сходимости установлено, что минимальный размер элемента должен составлять не более $5 \cdot 10^{-3}$ мм. Дальнейшее измельчение не вносит вклада в качественное и количественное решения.

Для определения оптимального шага по времени при решении поставленной задачи проведена серия расчетов. При шагах, равных 10^{-4} и 10^{-5} с, решение было нестабильным, струя имела нефизичную форму. При шаге, составляющем 10^{-6} с, дробления струи не происходило. При шаге 10^{-7} с расчет стал стабильным, появилось дробление струи жидкости, достигалась сходимость расчета по расходу. Поэтому на данной расчетной сетке было принято решение использовать шаг по времени 10^{-7} с и для других начальных условий.

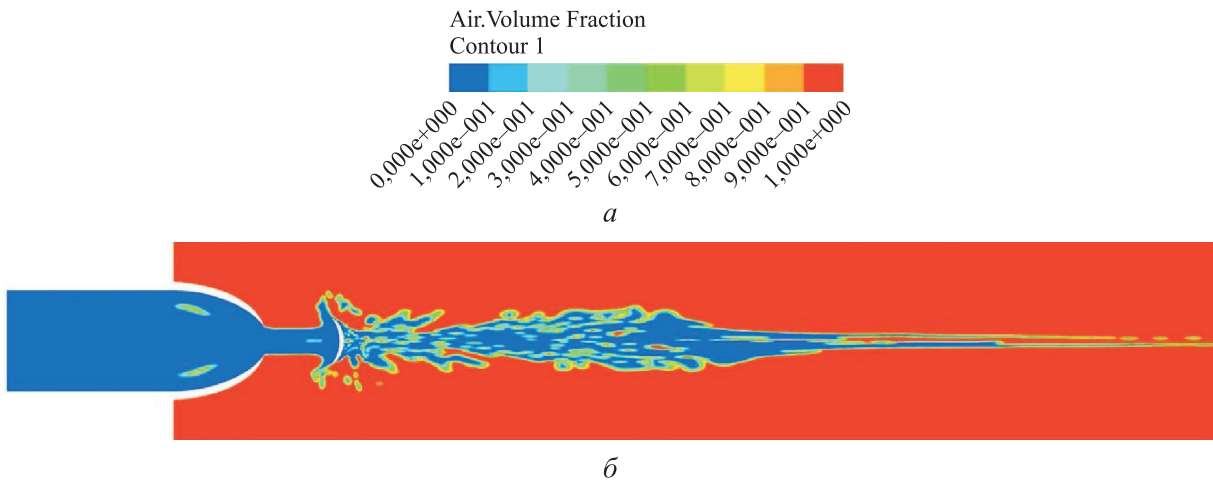


Рис. 6. Поля объемной доли ЖФ в расчетной области при постоянных (а) и реальных (б) теплофизических свойствах ЖФ

Начальные и граничные условия. Начальные и граничные условия приведены на рис. 5. На входе в камеру подачи ЖФ смоделирован поток воды при температуре $T = 300$ К и давлении $p = 1$ и 2 МПа, а на входе в диффузор подачи воздуха — поток воздуха при скорости 0,6 М (М — число Маха) и температуре 1200 К для достижения быстрого прогрева жидкой струи и исследования влияния теплопередачи на процесс ее разбиения. На выходе из расчетной области давление потока $p = 0,05$ МПа, температура $T = 300$ К.

В расчетной области моделировали вязкое турбулентное течение водовоздушной смеси с постоянными и реальными (зависящими от температуры) теплофизическими свойствами воды.

Для определения полей газодинамических характеристик течения потока решали систему нестационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Фавру [7, 8], замыкаемую моделью турбулентности $k-\omega$ SST (Shear Stress

Transport) и уравнением состояния идеального газа.

Результаты численного моделирования. В ходе моделирования получены поля газодинамических параметров. Поля объемной доли ЖФ в расчетной области при постоянных теплофизических свойствах приведены на рис. 6, а. Видно, что после достижения струи отражателя капли жидкости, образованные соударением струи о препятствие, сбиваются спутным воздушным потоком к оси форсунки, что препятствует диспергированию. Впоследствии капли коагулируют, вытягиваясь в неоднородную струю со сложной границей раздела. К концу расчетной области вновь образуются мелкие капли из-за преобладания аэродинамических сил над силами вязкого трения.

Так как заданные реальные теплофизические свойства зависят от температуры и с ее повышением уменьшают свои значения, при теплообмене ЖФ с ГФ жидкость нагревается и

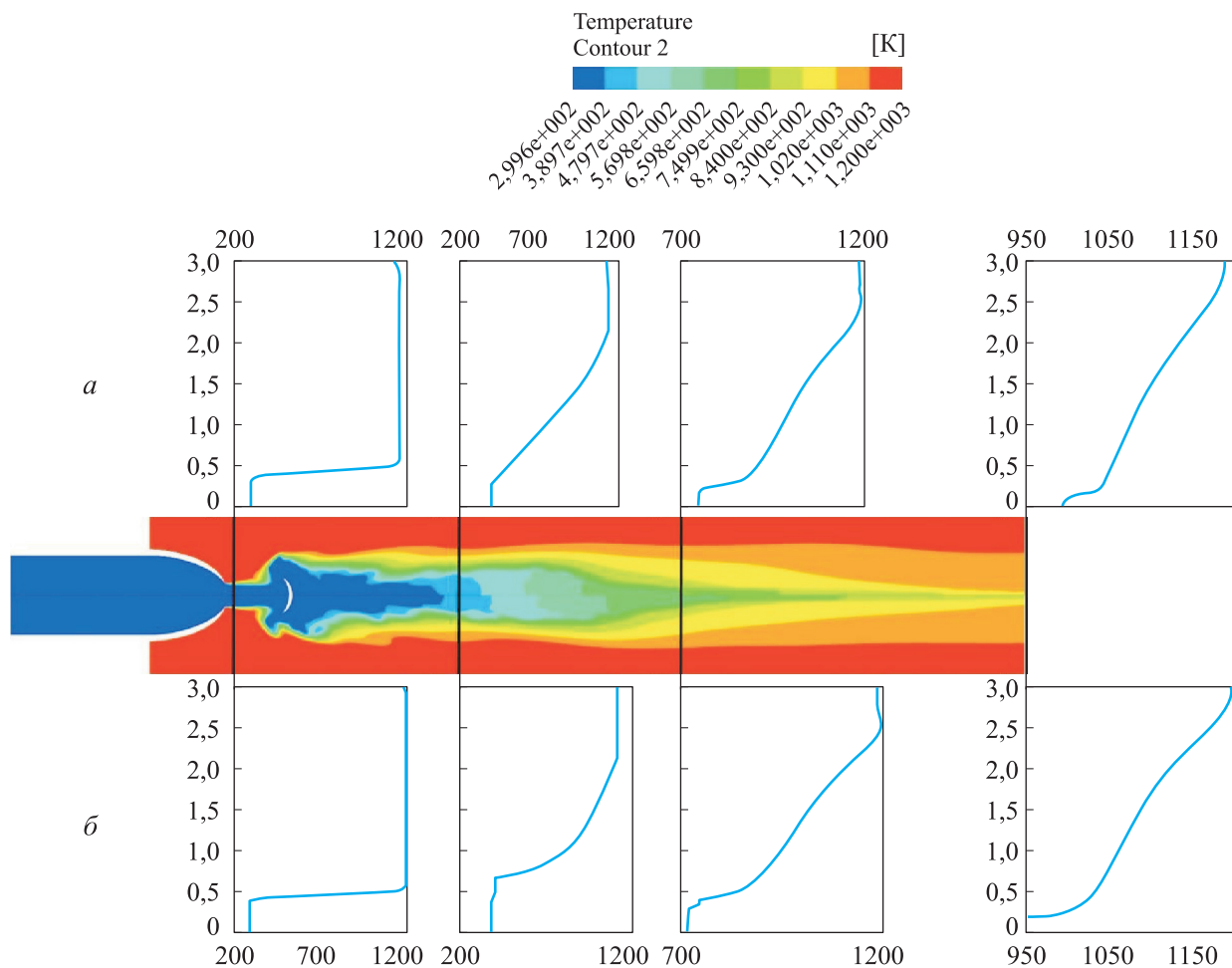


Рис. 7. Поля температуры ДФП, К, в расчетной области при постоянных (а) и реальных (б) теплофизических свойствах ЖФ

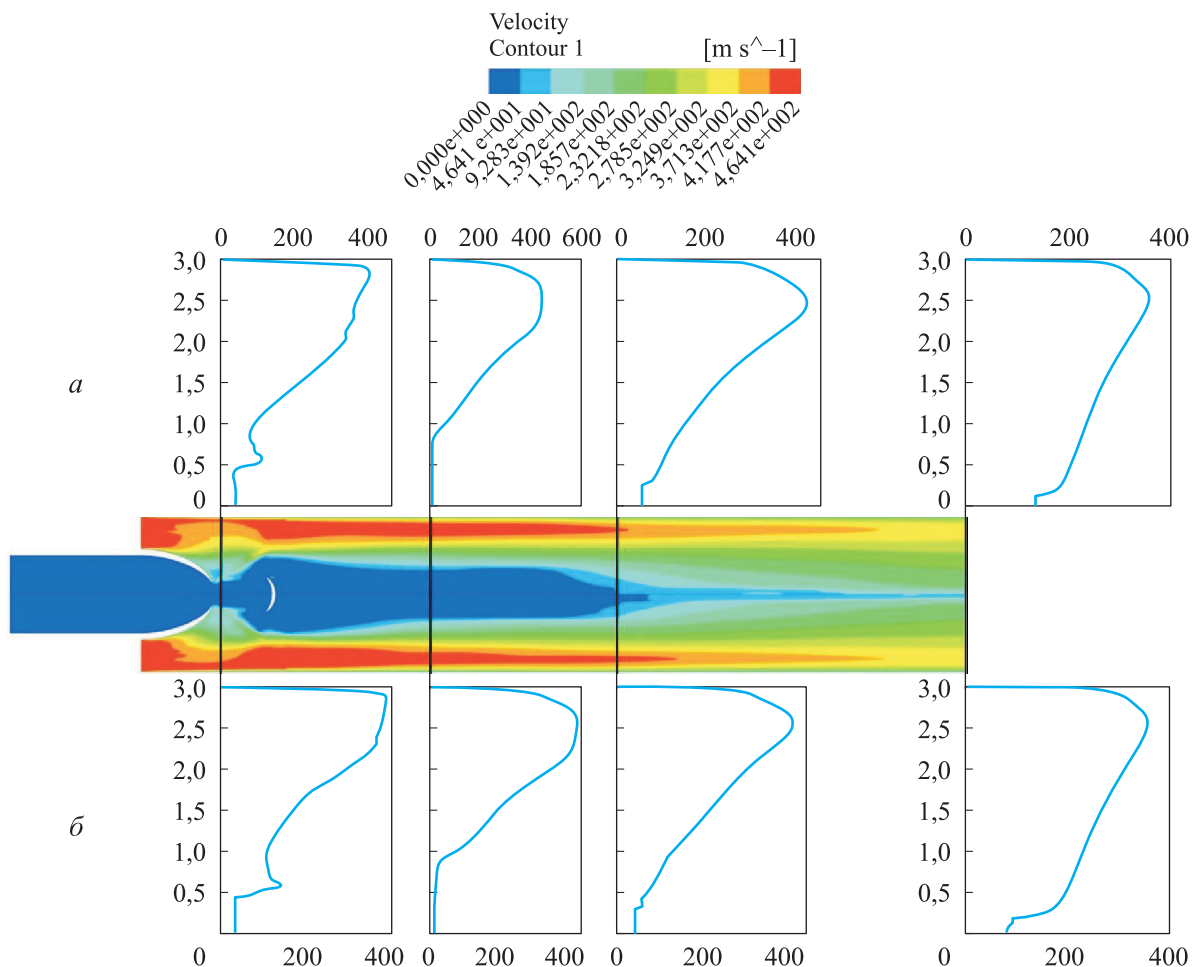


Рис. 8. Поля скорости ДФП, м/с, в расчетной области при постоянных (а) и реальных (б) теплофизических свойствах ЖФ

капиллярные силы воды уменьшаются. Однако наличие спутного потока воздуха устремляет струю к оси форсунки, вследствие чего мелкие капли также не образуются, что и показано на рис. 6, б.

Поле температуры ДФП в расчетной области для ЖФ с постоянными теплофизическими свойствами приведено на рис. 7, а (где видно, что градиент температур имеет слоистый характер в струе), а для ЖФ с реальными свойствами — на рис. 7, б. В сечениях по длине расчетной области показаны зависимости температуры (К) от ординаты этой области (мм). Поля температуры, представленные на рис. 7, а и б, кардинальных различий не имеют.

На рис. 8, а и б приведены поля скорости ДФП в расчетной области при постоянных и реальных теплофизических свойствах ЖФ соответственно. В сечениях по длине расчетной области показаны зависимости скорости ДФП (м/с) от ординаты этой области (мм). Как и в случае с температурой ДФП, существенных раз-

личий между полями, показанными на рис. 8, а и б, не наблюдается.

Определение интегральных характеристик двухфазного течения потока. В качестве интегральных характеристик, описывающих качество процесса смешения, выбраны объемная доля ЖФ (как мера распределения жидкости в сечениях расчетной области по длине канала) и температура ДФП (как мера взаимного проникания фаз).

Результаты численного моделирования, полученные для диапазона изменения входного давления воды, позволяют не только выявить характерные газодинамические особенности течения ДФП, но и определить интегральные характеристики объемного содержания ЖФ и температуры в сечениях по длине УСФ. Судя по вычисленным интегральным характеристикам, жидкая струя плохо дробилась в ДФП.

В таблице приведены расчетные интегральные характеристики ДФП в расчетной области,

Расчетные интегральные характеристики ДФП

p , МПа	$g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{const}}$	$g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{var}}$	T^{const} , К	T^{var} , К
1	0,66736871	0,67866992	0,00097373663	0,00097149322
2	0,61377171	0,61705984	0,00094896951	0,0010724108

где $g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{const}}$ и $g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{var}}$ — объемное содержание ЖФ (H_2O) с постоянными и реальными теплофизическими свойствами; T^{const} и T^{var} — усредненная по объему УСФ температура ДФП с постоянными и реальными теплофизическими свойствами ЖФ.

В работе [9] характерной величиной является распределение относительной массы. Для валидации этого расчета [10, 11] проведено сравнение полученных результатов с данными работы [9]. Сравнение объемной доли жидкой фазы по длине расчетной области [12, 13] показало, что в решении при постоянных теплофизических свойствах объемная доля жидкой фазы на 16 % меньше, чем при свойствах, зависящих от температуры [14, 15].

Выводы

1. Выполнено численное моделирование течения ДФП вблизи УСФ при давлении $p = 1$ и 2 МПа. Получены поля давления, скорости, температуры и объемной доли ДФП. Проведено сравнение полей ДФП с постоянными и реальными теплофизическими свойствами.

2. Поля объемной доли ЖФ при обоих начальных условиях имеют аналогичную структуру. Качественные оценки показали, что ис-

пользование реальных теплофизических свойств не увеличивает разбиения струи. При использовании реальных теплофизических свойств поля газодинамических параметров изменялись незначительно.

3. Проведено сравнение интегральных характеристик ДФП с постоянными и реальными теплофизическими свойствами, в ходе которого определено, что при реальных теплофизических свойствах ЖФ объемная доля ЖФ на 16 % больше, чем при постоянных.

4. При сравнении полученных результатов с работой [9] различие удельного распределения относительной массы составило 7 %. Таким образом, исследование показало, что постоянные теплофизические свойства нельзя использовать при выбранных граничных условиях и геометрии, поскольку имеются кардинальные отличия от газодинамических параметров ДФП со свойствами ЖФ, зависящими от температуры. В рассмотренном диапазоне начальных давлений жидкости у форсунки с рассмотренной геометрией наблюдается небольшой угол распыла. Происходит это по причине превосходства инерционных сил над молекулярными силами жидкости, что не позволяет каплям дробиться и заставляет коагулировать.

Литература

- [1] Матюнин О.О., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Численное моделирование течения в полости струйно-струйной жидкостной форсунки. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2015, № 43, с. 19–33.
- [2] Лисицин А.Н., Бадерников А.В., Печеник Е.В. Результаты численного моделирования двухфазного течения жидкость/газ на основе упрощенной модели масляного картера. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2014, № 5(47), ч. 2, с. 135–142.
- [3] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Москва, Наука, 1972, с. 48–49, 51, 53.
- [4] Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. *Многофазные течения газа с частицами*. Москва, Машиностроение, 1994. 320 с.
- [5] Лисицин А.Н. *Повышение эффективности проектирования масляных полостей опор ГТД на основе метода численного моделирования двухфазного течения*. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2015. 128 с.

- [6] Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, vol. 39(1), pp. 201–225, doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5
- [7] Favre A. Equations des gaz turbulents compressibles. Part 1: Formes generales. *Journal de Mecanique*, 1965, vol. 4, no. 3, pp. 361–390.
- [8] Favre A. Equations des gaz turbulents compressibles. Part 2: Method des vitesses moyennes; method des vitesses moyennes ponderees par la masse volumique. *Journal de Mecanique*, 1965, vol. 4, no. 3, pp. 391–421.
- [9] Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Прохоров А.Н., Сучков С.А., Филимонов Л.А. Анализ влияния типа форсунок и направления впрыска жидкости на эффективность двухфазного смесеобразования в канале постоянного сечения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 7, с. 94–104, doi: 10.18698/0536-1044-2016-7-94-104
- [10] Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. Numerical investigation for criteria of compactness for two-phase jets. *Fluid-particle interaction-VI conference*, 25–30 August, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session.
- [11] Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. An experimental investigation of heterogeneous jet with a large mass loading ratio in the propeller flow. *Fluid-particle interaction-VI conference*, 25–30 August, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session.
- [12] Naphon P. Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 34(3), pp. 321–330, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.11.009
- [13] Naphon P., Wongwises S. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, vol. 10, no. 5, pp. 463–490, doi: 10.1016/j.rser.2004.09.014
- [14] Jayakumar J.S., Mahajani S.M., Mandal J.C., Vijayan P.K., Bhoi R. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, vol. 86(3), pp. 221–232, doi: 10.1016/j.cherd.2007.10.021
- [15] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaei H. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, vol. 34(7), pp. 900–905, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.02.004

References

- [1] Matyunin O.O., Bachev N.L., Bul'bovich R.V. Numerical simulation of the flow in two-component fuel injector. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2015, no. 43, pp. 19–33 (in Russ.), doi: 10.15593/2224-9982/2015.43.02
- [2] Lisitsin A.N., Badernikov A.V., Pechenik E.V. Results of numerical modeling of two-phase liquid/gas flow on the basis of a simplified model of oil chamber. *Vestnik of Samara University. Aerospace and mechanical engineering*, 2014, no. 5(47), pt. 2, pp. 135–142 (in Russ.).
- [3] Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka publ., 1972, pp. 48–49, 51, 53.
- [4] Sternin L.E., Shrayber A.A. *Mnogofaznyye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase gas flow with particles]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1994. 320 p.
- [5] Lisitsin A.N. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya maslyanyh polostey opor GTD na osnove metoda chislennogo modelirovaniya dvuhfaznogo techeniya*. Kand. Diss. [Improving design efficiency oil cavity support GTE based on the numerical modeling method two-phase flows. Cand. Diss.]. Rybinsk, 2015. 128 p.
- [6] Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, vol. 39(1), pp. 201–225, doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5
- [7] Favre A. Equations des gaz turbulents compressibles. Part 1: Formes generales. *Journal de Mecanique*, 1965, vol. 4, no. 3, pp. 361–390.
- [8] Favre A. Equations des gaz turbulents compressibles. Part 2: Method des vitesses moyennes; method des vitesses moyennes ponderees par la masse volumique. *Journal de Mecanique*, 1965, vol. 4, no. 3, pp. 391–421.

- [9] Aref'yev K.Yu., Voronetskiy A.V., Prokhorov A.N., Suchkov S.A., Filimonov L.A. The Analysis of Influence of the Nozzle Structure and Fluid Injection Path on the Efficiency of Two-Phase Mixing in a Constant Cross Section Channel. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 7, pp. 94–104 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2016-7-94-104
- [10] Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. Numerical investigation for criteria of compactness for two-phase jets. *Fluid-particle interaction-VI conference*, 25–30 august, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session.
- [11] Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. An experimental investigation of heterogeneous jet with a large mass loading ratio in the propeller flow. *Fluid-particle interaction-VI conference*, 25–30 august, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session.
- [12] Naphon P. Thermal performance and pressure drop of the helical-coil heat exchangers with and without helically crimped fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 34(3), pp. 321–330, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.11.009
- [13] Naphon P., Wongwises S. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, vol. 10, no. 5, pp. 463–490, doi: 10.1016/j.rser.2004.09.014
- [14] Jayakumar J.S., Mahajani S.M., Mandal J.C., Vijayan P.K., Bhoi R. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, vol. 86(3), pp. 221–232, doi: 10.1016/j.cherd.2007.10.021
- [15] Ghorbani N., Taherian H., Gorji M., Mirgolbabaei H. Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, vol. 34(7), pp. 900–905, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.02.004

Статья поступила в редакцию 17.01.2019

Информация об авторах

ХЛОПОВ Андрей Дмитриевич — инженер отдела «Газовая динамика силовых установок». ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2, e-mail: shodaime96@gmail.com).

ФРАНЦУЗОВ Максим Сергеевич — младший научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели». ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»; ассистент кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mfrancuzov@yandex.ru).

Information about the authors

KHLOPOV Andrei Dmitrievich — Engineer, Department of Gas Dynamics of Power Plants. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Avaimotornaya St., Bldg. 2, e-mail: shodaime96@gmail.com).

FRANTSUZOV Maksim Sergeevich — Junior Research Scientist, Aerospace Engine Department. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM; Assistant Lecturer, Department of Thermophysics, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mfrancuzov@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хлопов А.Д., Французов М.С. Результаты численного моделирования двухфазного течения жидкость/газ при постоянных и реальных теплофизических свойствах жидкости в ударно-струйной форсунке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 51–60, doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-51-60

Please cite this article in English as:

Khlopov A.D., Frantsuzov M.C. The Results of Numerical Simulation of Two-Phase Liquid-Gas Flow with Constant and Real Thermodynamics Properties of the Liquid in a Shock-Jet Nozzle. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 3, pp. 51–60, doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-51-60