

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОТОКА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАЗЕМНЫХ СТЕНДАХ ПОСРЕДСТВОМ ВПРЫСКА ВОДЫ

К.В. Поляков

konstantin.vl.p@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены физические процессы в экспериментальных стендовых системах для проведения наземных испытаний авиационно-космической техники, а также процесс охлаждения продуктов сгорания посредством впрыска воды в газодинамический контур выхлопной системы. Проведены расчеты параметров инжектируемой струи воды, численное моделирование процессов взаимодействия жидких капель с газовым потоком (впрыск, дробление, испарение и т. д.). Рассмотрены модельные и верификационные задачи, обоснование методов расчета реальных стендовых систем, работающих при температурах входного газа от 1000 до 3500 К, давлении 1–2 бар и дозвуковой скорости газа. С помощью программного комплекса выполнено моделирование и определены основные параметры выходного потока. Для описания движения капель в сплошной среде использована модель дискретной фазы DPM.

Ключевые слова

Дробление, распыление, модель распада, охлаждение высокотемпературного потока

Поступила в редакцию 29.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Экспериментальные исследования являются весьма дорогостоящими. Число параметров при таких исследованиях может достигать нескольких сотен. Таким образом, для детального исследования, выбора оптимальных параметров, геометрии, режимов работы потребуются значительные вложения. В таких случаях более рациональным представляется использование математического моделирования процессов, происходящих в исследуемых трактах.

В настоящей работе проводится расчетное исследование процесса распыла и испарения капель в модельном канале. В качестве модельного рассматривается канал прямоугольного поперечного сечения с критическим сечением (рис. 1).

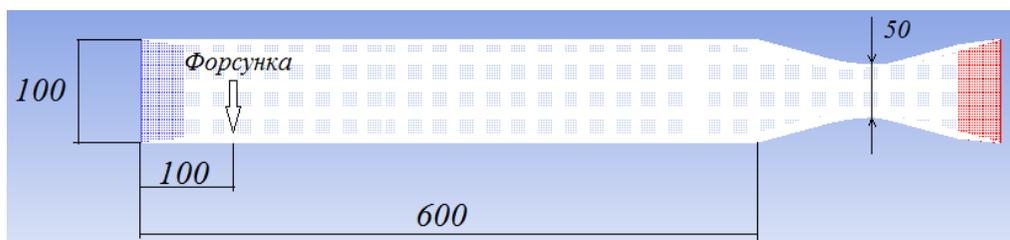


Рис. 1. Модельный канал и некоторые его параметры

Для проведения расчетов в модельном канале построена расчетная адаптивная гексагональная структурированная расчетная сетка, состоящая из 650 элементов.

Расчет производили в два этапа. На первом этапе в канале нашли стационарное решение без подачи жидких капель. На втором — подавали капли и произвели нестационарный расчет течения. Начальные и граничные условия представлены ниже. Отметим также, что исследуемый газ — это воздух.

Начальные и граничные условия при исследовании

Название величины	Количественная характеристика
Скорость потока, w 200 м/с
Температура на входе, T 1000 К
Давление на входе, P_1 10^4 Па
Давление на выходе, P_2 10^3 Па
Шаг по времени, t $2,5 \cdot 10^{-6}$ с

Согласно критерию Вебера, была выбрана Taylor Analogy Breakup модель распада:

$$We = \rho d v^2 / \sigma, \quad (1)$$

где ρ — плотность, кг/м^3 ; d — диаметр капли в недеформированном состоянии, м; v — скорость, м/с; σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Расчет смесительных элементов струйного типа производили посредством стандартной методики, описанной М.В. Добровольским [1].

Турбулентность потока учитывали с помощью k - ω -SST-модели турбулентности [2].

Для моделирования течения газовой фазы применяли общеизвестные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье—Стокса [3].

Перенос тепла моделировали, используя подход Ранца—Маршалла [4].

Движение капель воды в газообразной среде моделировали с помощью подхода Лагранжа (модель дискретной фазы). Модель учитывает двустороннее взаимодействие жидкой и газообразной фаз, перенос импульса, энергии и массы [5].

Результаты стационарного решения представлены на рис. 2.

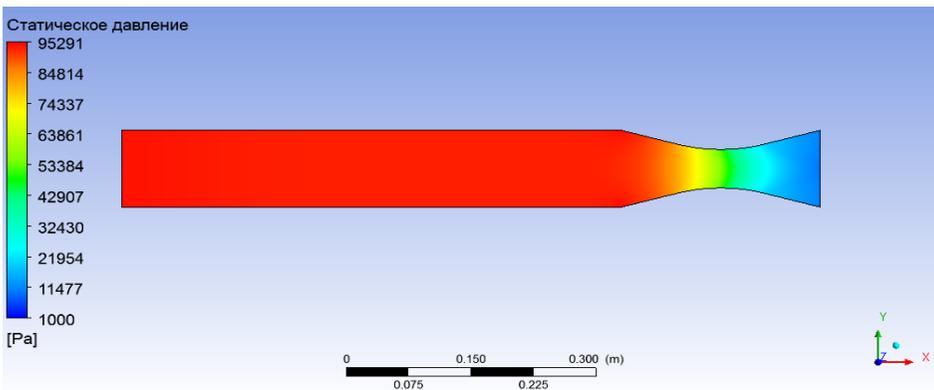


Рис. 2. Стационарное поле давлений

Результаты расчета в условиях подачи воды через форсунку с расходом 50 г/с представлены на рис. 3 и 4.

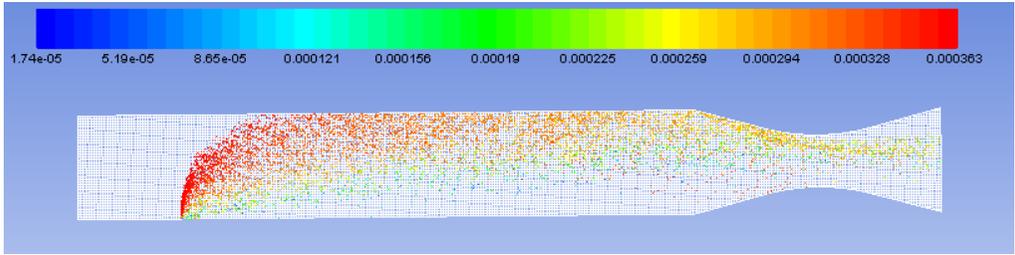
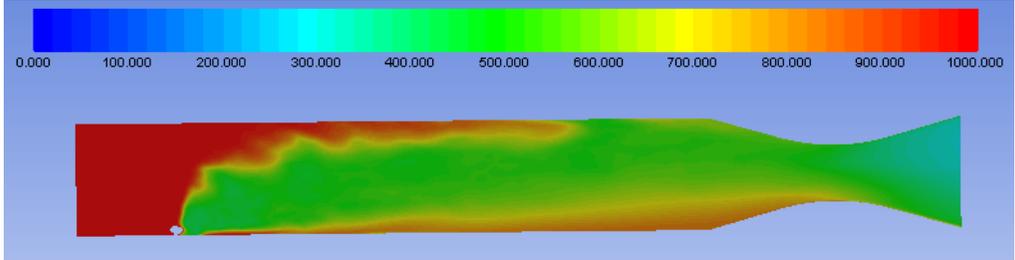


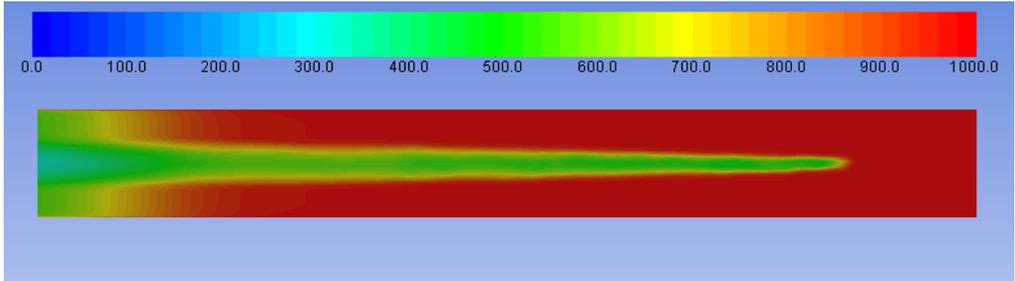
Рис. 3. Диаметр капель

Обратим внимание, что на рис. 4, а распределение температур происходит в плоскости ХОУ и наблюдается охлаждение потока за счет впрыска воды с температурой ниже температуры потока. Таким образом, показана принципиальная возможность процесса охлаждения высокотемпературного потока жидкими каплями на основе численного моделирования.

На рис. 4, б видно, что распыл жидкости происходит только в вертикальном направлении. Жидкость не распространяется по ширине канала, и, как следствие, не охлаждает поток в поперечном направлении.



а



б

Рис. 4. Температура потока (а) и то же в вертикальной проекции (б)

Попробуем устранить данный недостаток путем установки нескольких форсунок (рис. 5).

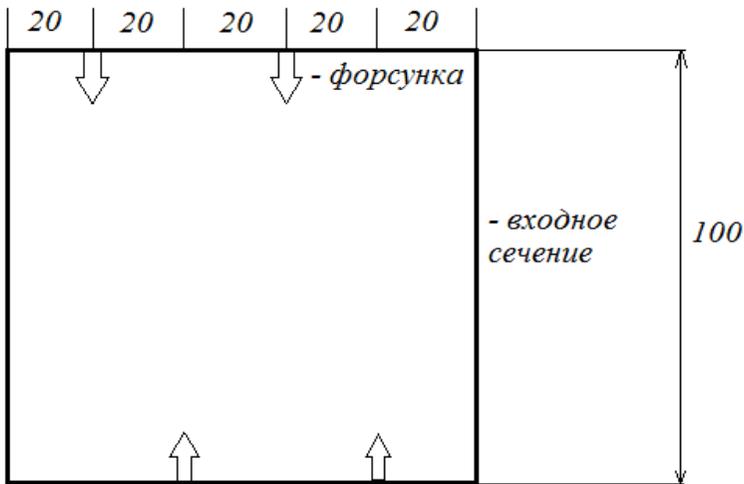


Рис. 5. Расположение форсунок, при котором происходит охлаждение потока

Выводы. Проведено расчетное исследование процессов охлаждения высокотемпературного газового потока с помощью впрыска воды. Продемонстрировано, что значительное снижение температуры достигается при массовом расходе жидких капель 50 г/с, подаваемых перпендикулярно потоку. Массовая доля паров воды в выходном сечении канала составляет 62 %. Более равномерное по сечению распределения температуры возможно при изменении способа подачи и числа подающих отверстий.

Также произведены расчеты высокотемпературного воздушного потока с целью упрощения знакомства с современными возможностями программных комплексов.

Литература

- [1] Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 488 с.
- [2] Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического института, 2012, 88 с.
- [3] de Feo D.M., Shaw S.T. Turbulence modeling and supersonic base flows. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, 2007, AIAA 2007-1083.
- [4] Ranz W.E., Marshal W.R. Evaporation from drops. Part I, Part II. *Chem. Eng. Prog.*, 1952, no. 48(4), pp. 141–146, pp. 173–180.
- [5] ANSYS CFX 16.1 *Theory Guide*. Canonsburg, Ansys Inc., 2015.

Поляков Константин Владимирович — студент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — М.С. Французов, ассистент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SIMULATING THE PROCESS OF COOLING THE HIGH TEMPERATURE FLOW IN EXPERIMENTAL GROUND RIGS BY MEANS OF WATER INJECTION

K.V. Polyakov

konstantin.vl.p@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers physical processes in the experimental ground rigs used for aerospace engineering ground testing as well as the process of cooling combustion products by means of water injection into the exhaust system gasdynamic contour. We calculated the parameters of the injected wash jet and numerically simulated the interacting processes of liquid droplets with gas flow (injection, split, evaporation etc.). This work examines the model and verificatory problems, justifying the methods of calculating the real stand systems operating at the inlet gas temperatures varying from 1000 to 3500 K, the pressure of about 1...2 bar and the subsonic velocity of the gas. By means of the software package we accomplished the simulation and defined the basic parameters of the outlet flow. For describing the motion of the droplets in the continuous medium the discrete phase DPM model was used.

Keywords

Split, diffusion, disintegration model, cooling the high temperature flow

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Dobrovolskiy M.V Zhidkostnye raketnye dvigateli [Liquid rocket engines]. Moscow, Bauman Press, 2016, 488 p.
- [2] Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy [Turbulence modelling in complex flows calculation]. Sankt-Petersburg, SPbSTU publ., 2012, 88 p.
- [3] de Feo D.M., Shaw S.T. Turbulence modeling and supersonic base flows. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, 2007, AIAA 2007-1083.
- [4] Ranz W.E., Marshal W.R. Evaporation from drops. Part I, Part II. *Chem. Eng. Prog.*, 1952, no. 48(4), pp. 141–146, pp. 173–180.
- [5] ANSYS CFX 16.1 Theory Guide. Canonsburg, Ansys Inc., 2015.

Polyakov K.V. — student, Department of Thermophysics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Frantsuzov M.S., Assistant Lecturer of Thermophysics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.