

DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.12

УДК 629.7.018.1:629.7.036.54-66

А.Н. Ефремов, А.Г. Тимаров

ПАО «Научно-производственное объединение “Искра”», Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАКТЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

Особенностью работы газодинамической трубы (ГДТ) для испытания ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) является особенно сильное тепловое воздействие на конструкцию в зоне присоединения двухфазной струи продуктов сгорания (газовая и конденсированная фазы) к стенке диффузора. Именно поэтому в ГДТ для испытаний РДТТ используется комбинированная система охлаждения, заключающаяся в том, что помимо рубашечного охлаждения в районе присоединения струи продуктов сгорания к стенке диффузора осуществляется впрыск воды непосредственно в тракт. При этом принципиально важно правильно организовать впрыск воды в тракт ГДТ. Необходимо выбрать расход воды, подаваемой на впрыск, диаметр, расположение и ориентацию форсунок, через которые осуществляется инжекция воды. Неудачное решение по выбору вышеуказанных параметров может привести к неэффективному охлаждению конструкции ГДТ, снижению ресурса материальной части и даже к нереализации режима безотрывного истечения из сопла. С помощью одного из коммерческих пакетов вычислительной газодинамики проведено численное моделирование газодинамических процессов в тракте ГДТ, где основной акцент сделан на сложной реализации многокомпонентного, многофазного течения при одновременной работе РДТТ и системы впрыска воды, с учетом фазового перехода капель воды в парообразное состояние. Выполнено сопоставление результатов вычислительных экспериментов с экспериментальными данными. Предложены пути повышения эффективности охлаждения ГДТ за счет более рациональной организации впрыска воды в газовый тракт.

Ключевые слова: газодинамическая труба, вычислительная гидродинамика, стендовые испытания, ракетный двигатель твердого топлива.

A.N. Efremov, A.G. Timarov

PJSC Research and Production Association “Iskra”, Perm, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF GAS-DYNAMIC PROCESSES IN GAS-DYNAMIC TUNNEL

A feature of the gas-dynamic tunnel (GDT) for testing a solid rocket motor (SRM) is a heat impact on the structure in the two-phase jet attachment zone of combustion products (gas and condensed phase) to the diffuser wall. Therefore, in the GDT for SRM tests there is a combined cooling system: along with regenerative cooling it contains water injection into the zone where two-phase jet of the combustion products attaches to diffuser wall. At the same time it is essential to organize the water injection into the GDT tract. It is necessary to select the flow of water supplied to the injection, the diameter, location, and orientation of the nozzles through which water injection. The bad choice of the above parameters can lead to inefficient cooling GDT, reducing service life and impossibility of the

unseparated outflow from a nozzle. The numerical simulation of the gas-dynamic processes in the GTD tract was performed in a software package for computational gas dynamics. The focus is on the complex implementation of a multi-component multi-phase flow during simultaneous operation of SRM and water spray system, taking into account the phase transition of water droplets to the vapor state. The comparison of the results of computational experiments with the experimental data was carried out. The ways of improving the efficiency of the cooling GDT by more reasonable design of the water spray system were suggested.

Keywords: gas-dynamic tunnel, computational hydrodynamics, bench tests, solid rocket motor.

Газодинамическая труба (ГДТ) представляет собой относительно простое устройство, применяемое при проведении стендовых испытаний (СИ) ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) для создания безотрывного течения в соплах, на срезе которых давление существенно ниже атмосферного. Создание условий разряжения в районе среза обеспечивается за счет эжектирующего действия истекающей из двигателя струи продуктов сгорания (ПС).

Основными целями испытаний с имитацией высотных условий являются:

- подтверждение тепловой и эрозионной стойкости раструба;
- экспериментальное определение величины пустотного импульса тяги;
- оценка работоспособности элементов конструкции двигательной установки [1].

ГДТ состоит из барокамеры, которая охватывает сопло двигателя (или весь двигатель целиком) и выхлопного диффузора, который состоит из двух конических (входной и выходной) и одной цилиндрической секций (так называемый цилиндрикоконический диффузор с геометрией проточного тракта близкой к оптимальной). Стоит отметить, что в ходе работы двигателя ГДТ находится под значительным тепловым и силовым воздействием струи ПС, вследствие чего предусмотрена система комбинированного охлаждения диффузора, которая обеспечивает работоспособность конструкции на протяжении всей работы РДТТ [2, 3]. Выбор типа охлаждения, как правило, зависит от величины теплового потока, действующего на конструкцию, и суммарного количества тепла.

Начальный участок газодинамической трубы, особенно при наличии входного конуса, подвергается наибольшему тепловым нагрузкам вследствие присоединения к ней сверхзвуковой струи ПС и интенсивного осаждения частиц конденсированной фазы (к-фазы). Охлаждение входного конического участка осуществляется за счет внутрен-

него охлаждения, путем создания водяной завесы с помощью впрыска воды через форсунки, расположенные по периферии поперечного сечения диффузора. Цилиндрический и выходной конический каналы охлаждаются с помощью системы рубашечного охлаждения. На рис. 1 представлен пример конструкции выхлопного диффузора.

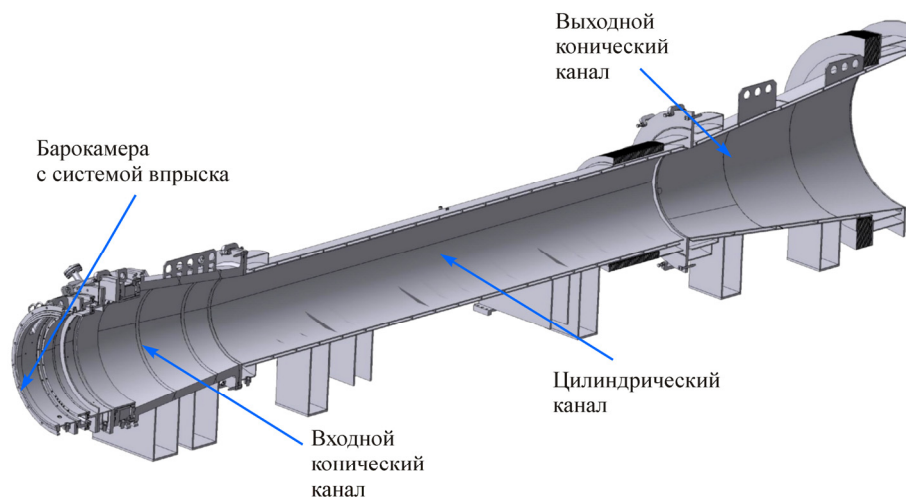


Рис. 1. Схематичное изображение устройства ГДТ

В описанной ГДТ проведено два успешных СИ двух РДТТ, отличающихся друг от друга степенью расширения сопел. Тепловой режим ГДТ в ходе прошедших испытаний оказался более тяжелым по сравнению с ожидаемым. У входной конической секции, которая является наиболее теплонапряженным элементов высотного стенда, помимо большего прогрева, также был зафиксирован значительный унос внутренней стенки канала. Недостаточно эффективное охлаждение газодинамического тракта посредством внутреннего охлаждения в начале выхлопного диффузора привело к повышению температуры и в системе рубашечного охлаждения цилиндрического и выходного конического каналов. Такое тепловое состояние могло быть реализовано при попадании в поток существенно меньшего количества воды, чем подавалось на впрыск.

Из анализа проведенных СИ был сделан вывод, что имеющиеся данные по расчету основных характеристик ГДТ позволяют только качественно оценить эффективность работы внутреннего охлаждения.

При этом объяснение неэффективной работы узла впрыска вступало в противоречие с некоторыми экспериментальными данными. В результате было принято решение провести численное моделирование работы ГДТ в коммерческом пакете вычислительной гидродинамики.

В существующих подходах к численному моделированию газодинамических процессов в ГДТ принимается важное допущение, что вся впрыскиваемая в газодинамический тракт вода находится в паробразном состоянии. Это упрощение не позволяет оценить работу узла впрыска, а также эффективность внутреннего охлаждения на начальном участке ГДТ. В связи с этим было принято решение попытаться смоделировать течение с учетом впрыска струи воды, распада ее на капли и их дальнейшим испарением.

Для проведения численного эксперимента была создана расчетная модель и определены граничные условия. При решении поставленной задачи все процессы рассматривались в осесимметричной стационарной постановке для расчетного сектора величиной $\sim 4^\circ$.

Для проведения моделирования впрыска с учетом распада необходимо качественно представлять протекание данного процесса. Струя воды, выходя из распылительной форсунки, проходит два этапа распада. На первом этапе происходит распад плотной струи на крупные капли, диаметр которых приблизительно равен диаметру отверстия. На втором этапе существующие капли распадаются на более мелкие, в результате чего создается разреженная струя. Пример механизма распада приведен на рис. 2.

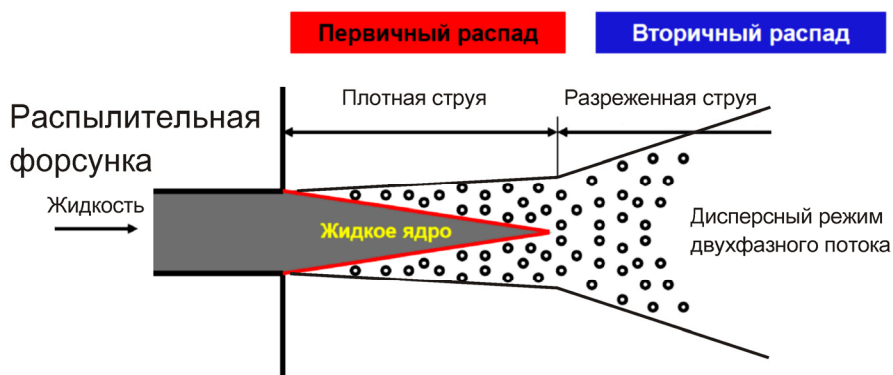


Рис. 2. Механизм распада струи

При описании граничных условий для струи воды использовалась лагранжева модель частиц (основные положения представлены в работах [4–7]), учитывалось их полное сопряжение с ПС. Взаимодействие капель воды друг с другом не учитывалось. По результатам тестовых расчетов была выбрана математическая модель распада струи.

В качестве модели первичного распада использовался «метод Капли», известный также как Vlob method. Главной задачей для описания модели первичного распада является определение начальных параметров капель воды, которые выходят из инжекционной форсунки (задается начальный радиус частицы, начальный компонент скорости, начальный угол распыла).

Вторичный распад происходит за счет аэродинамических сил, которые действуют на каплю. Режим распада обычно определяется через выражения безразмерных чисел, таких как число Вебера. В качестве модели вторичного распада использовалась модель, известная как МСАВ [8]. При моделировании данного этапа используется статический подход, в котором применяется процесс распада струи для представительной частицы и всех N физических частиц, которые представлены в виде расчетных. Если капля распадается, тогда изменяются ее диаметр, масса, а также количество частиц N . Однако необходимо отметить, что при распаде масса вычисляемых частиц должна сохраняться.

Также при моделировании впрыска воды в газодинамический тракт учитывалась модель испарения жидкости, из-за чего рабочее тело было описано как смесь переменной концентрации ПС твердого топлива и водяного пара. Данная модель фазового перехода от жидкого состояния капли воды к газообразному использует две корреляции массопереноса, которые зависят от точки кипения или температурной точки, которая вычисляется через уравнение Антуана. Точкой кипения называют такую температуру жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно внешнему давлению. При этом удельная (скрытая) теплота парообразования вычислялась из свойств гомогенной смеси жидкой и газообразной воды [9, 10].

Для проведения расчета также были определены базовые параметры потока. В качестве модели турбулентности использовалась модель standard k - ϵ , а в качестве модели теплообмена была задействована модель полной энергии для сжимаемых течений, в которой плотность является функцией давления. Выбор модели турбулентности

обусловлен приемлемым компромиссом между затратами на расчет вычислительных мощностей и вычислительной точностью.

При описании локальных граничных условий, определяющих характер течения в расчетной области, были приняты следующие параметры:

– Вход – использовалась величина полного давления в камере сгорания РДТТ, которая обеспечивала равномерное течение ПС с заданными свойствами.

– Стенка – условие прилипания, граничное условие 1-го рода по температуре ($T = \text{const}$ для определения тепловых потоков), которая была разделена на элементы, соответствующие поверхностям конструкции (сопло, входной и выходной конические участки, цилиндрический канал). При этом следует отметить, что при описании данного локального граничного условия отскок частиц воды был задан с коэффициентом 0,3, т.е. частица после отскока обладала 30 % от скорости, имеющейся до удара об стенку. В то же время для поверхности, которая имитировала поверхность барокамеры, было задано условие прилипания, т.е. коэффициент отскока был равен нулю.

– Выход – для улучшения сходимости расчета на данном локальном граничном условии был выбран «сверхзвуковой выход».

– Подвод частиц воды для внутреннего охлаждения был задан как точечный источник массы.

Пример расчетной модели и описания граничных условий приведен на рис. 3.



Рис. 3. Пример расчетной области

Проверка адекватности предлагаемой расчетной модели проведена с использованием экспериментальных данных, полученных при СИ. По результатам численного моделирования получена подробная картина течения в газодинамическом тракте ГДТ.

На рис. 4 представлены изолинии чисел Маха по расчетной области, а также вблизи узла впрыска. Из рисунка следует, что струя ПС,

истекая из сопла, присоединяется к входному конусу ГДТ. В результате этого прилипания между узлом впрыска и местом присоединения струи образуется вихревая зона. Вращение вихря, направленное навстречу впрыскиваемой жидкости, затормаживает и дробит частицы воды, препятствуя их проникновению в поток. Мелкие капли, находясь в периферийной зоне вихря, отбрасываются обратно в область узла впрыска и барокамеры. При анализе данной особенности течения в зоне узла впрыска получено, что из 100 % подаваемой воды в поток проникает от 40 до 60 % в зависимости от режима работы. Данные результаты хорошо согласуются с полученными при СИ повышенными тепловыми потоками в конструкцию ГДТ.

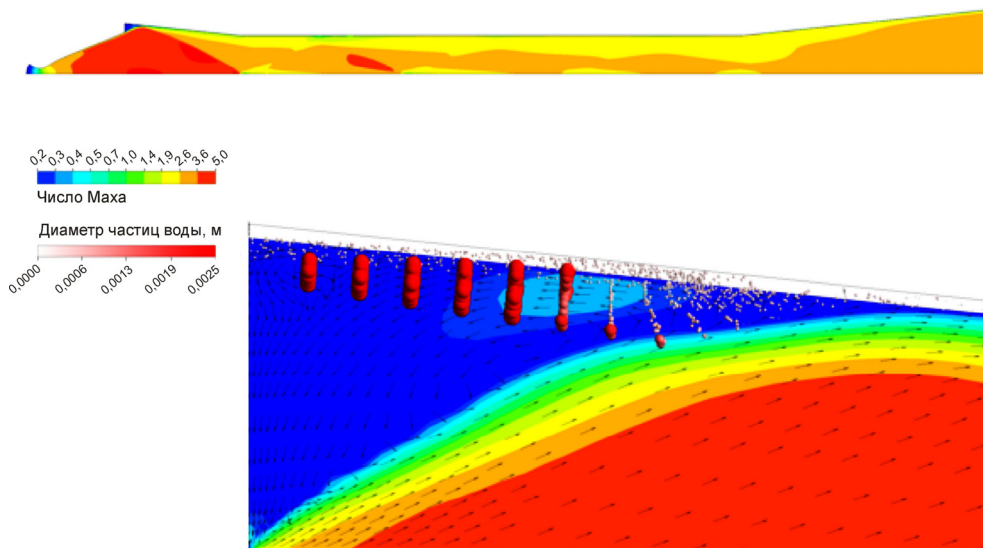


Рис. 4. Изолинии чисел Маха и картина распада струи воды

По результатам численного моделирования в коммерческом пакете гидродинамики газодинамических процессов в ГДТ можно отметить следующее:

– Создана расчетная модель, позволяющая моделировать течение в ГДТ с учетом впрыска воды. При этом вода задается как струя, переход которой в пар описывается моделью фазового перехода.

– По результатам расчета получена подробная картина течения в районе узла впрыска, демонстрирующая процессы распада основной струи на капли за счет впрыска частиц воды в расчетную область и под действием аэродинамических сил.

– Проведение расчетов по предлагаемой методике позволяет оптимизировать параметры узла впрыска с точки зрения повышения эффективности охлаждения стенок ГДТ.

Библиографический список

1. Конструкция и отработка РДТТ / А.М. Веницкий, В.Т. Волков, И.Г. Волковицкий, С.В. Холодилов. – М.: Машиностроение, 1980. – 230 с.
2. Шишков А.А., Силин Б.М. Высотные испытания реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1985. – 208 с.
3. Внутренняя баллистика РДТТ / А.В. Алиев, Г.Н. Амарантов, В.Ф. Ахмадеев [и др.]; под ред. А.М. Липанова. – М.: Машиностроение, 2007. – 504 с.
4. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1994. – 318 с.
5. Варкасин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. – М.: Физматлит, 2003. – 188 с.
6. Варкасин А.Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами. – М.: Физматлит, 2008. – 312 с.
7. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов [и др.]; под ред. А.С. Коротева. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
8. Kumzerova E., Esch T. Extension and validation of the CAB drop-let breakup model to a wide Weber number range // ILASS. – Como Lake, 2008. – Paper ID ILASS08-4-5.
9. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
10. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: Наука, 1995.

References

1. Vinitskiy A.M., Volkov V.T., Volkovitskiy I.G., Kholodilov S.V. Konstruktsiya i otrabotka RDTT [Designing and test of solid rocket motors]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 230 p.

2. Shishkov A.A., Silin B.M. Vysotnye ispytaniya reaktivnykh dvigateley [Altitude test of jet propulsion engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 208 p.

3. Aliev A.V., Amarantov G.N., Akhmadeev V.F. [et al]. Vnutrennyaya ballistika RDTT [Internal ballistics of solid rocket motors]. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 504 p.

4. Sternin L.E., Shrayber A.A. Mnogofaznye techeniya gaza s chas-titsami [Multiphase flows with particles]. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 318 p.

5. Varkasin A.Yu. Turbulentnye techeniya gaza s tverdymi chastit-sami [Turbulent gas flow with solid particles]. Moscow: Fizmatlit, 2003. 188 p.

6. Varkasin A.Yu. Stolknoveniya v potokakh gaza s tverdymi chas-titsami [Collision of gas with solid particles in flows]. Moscow: Fizmatlit, 2008. 312 p.

7. Gubertov A.M., Mironov V.V., Borisov D.M. [et al]. Gazodinamicheskie i teplofizicheskie protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva [Gasdynamic and thermophysical processes in solid rocket motors]. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 512 p.

8. Kumzerova E., Esch T. Extension and validation of the CAB droplet breakup model to a wide Weber number range. *ILASS*, Como Lake, 2008, Paper ID ILASS08-4-5.

9. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Fundamental heat transfer]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p.

10. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov [Handbook of mathematics for engineers and students]. Moscow: Nauka, 1995. 848 p.

Об авторах

Ефремов Андрей Николаевич (Пермь, Россия) – начальник сектора газодинамических и термодинамических расчетов отдела по энергетическим установкам ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: ean703@iskra.perm.ru).

Тимаров Алексей Георгиевич (Пермь, Россия) – инженер-конструктор 2-й категории сектора газодинамических и термодинамических расчетов отдела по энергетическим установкам ПАО «Научно-

производственное объединение “Искра”» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28, e-mail: tag703@iskra.perm.ru).

About the authors

Andrey N. Efremov (Perm, Russian Federation) – Chief of Sector, Propulsion Systems Department, PJSC Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneeva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: ean703@iskra.perm.ru).

Aleksey G. Timarov (Perm, Russian Federation) – Designer Engineer, Propulsion Systems Department, PJSC Research and Production Association “Iskra” (28, Akademika Vedeneeva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: tag703@iskra.perm.ru).

Получено 17.03.2016