

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА FLOWVISION ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ УТИЛИЗАЦИОННОГО СТЕНДА

Практика утилизации твердотопливных двигателей ракет, снятых по разным причинам с боевого дежурства, требует создания современных методик ее проведения. На этапе утилизации необходимо использование специального стенда, который позволит уменьшить температуру продуктов сгорания и снизить количество выбросов в атмосферу. Поэтому одним из основных элементов утилизационного стенда (УС) является газожидкостный эжектор (ГЖЭ). К достоинствам эжекторов можно отнести простоту конструкции, компактность, незначительный износ, возможность работы с засоренными и агрессивными средами. При проектировании ГЖЭ необходимо обеспечить, во-первых, снижение температуры продуктов сгорания до допустимых значений температуры стенок стенда, а во-вторых, исключить возникновение режимов «запирания» эжектора, сопровождающихся опасным увеличением давления в свободном объеме стенда. Условная схема закрытого стенда для утилизации РДТТ приведена на рис.1.



Рис. 1. Расчетная схема газожидкостного эжектора

Утилизационный стенд, разработанный НПК-2 ФГУП «НИИПМ», состоит из 8 секций переменного сечения, газохода и сепаратора. В утилизационном стенде осуществляются все процессы: от приема продуктов сгорания до их нейтрализации, оседания окислов металлов (твердых соединений), сбора в сепараторе отработанного нейтрализатора, продуктов сгорания, не вступивших в реакцию, и частичного выброса парогазовой смеси в атмосферу.

Габаритные размеры стенда 100×36×27 м. По окружности и периметру канала газохода расположены отверстия подачи воды. Принцип действия эжектора показан на рис. 2: давление газового потока – воздуха – увеличивается под действием струи другого более высоконапорного потока – струи продуктов сгорания РДТТ. При этом для более активного охлаждения продуктов сгорания и дальнейшего конденсирования пара и осаждения твердых частиц на дне сепаратора в камеру эжектора подается вода (через форсунки).

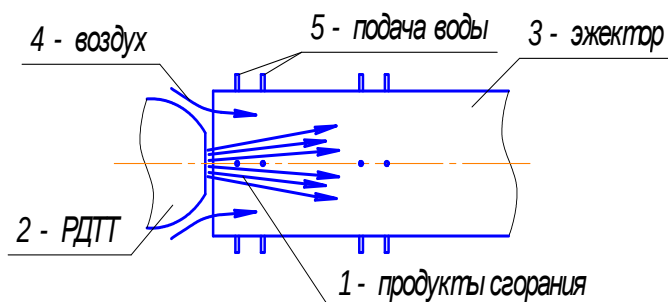


Рис. 2. Упрощенная схема газожидкостного эжектора

Отладка работы вновь создаваемых и модернизация существующих конструкций УС требует проведения предварительных исследований. Наиболее достоверные результаты могут быть получены в результате проведения натурных экспериментов. Однако изготовление и модификация натурной конструкции являются чрезвычайно дорогостоящими, а испытания связаны с проведением опасных работ. Поэтому нами принято решение о проведении вычислительного эксперимента по данной проблеме.

Для проведения вычислительного эксперимента использовались современные программные комплексы, предназначенные для решения задач механики жидкости и газа. Вычислительный эксперимент реализован в Региональном центре технической компетенции «AMD-ПГТУ» на 64-разрядном, 4-процессорном (OPTERON848) сервере в операционной системе Windows 2003 Server и 10-процессорном кластере на базе процессоров Athlon64 (рис. 3).

№ п/п	Наименование оборудования
1.	4-х процессорный сервер K-Systems Patriot 740 Q22180/02x073N L02 DVD WF M100 AMD Opteron 848 8 Гб ОЗУ
2.	Кластер из пяти рабочих станций K-Systems Irbis Ca 63051/80A DVD FX5700 LAN (SiS755) WXP M18 AMD Athlon 3000+ 512 Мб ОЗУ

Рис. 3. Компьютерное обеспечение Центра «AMD-ПГТУ»

Необходимость применения пакета прикладной программы FlowVision связана со сложностью постановки данной газодинамической задачи.

Использование программного комплекса FlowVision позволило провести первый этап расчета: динамический анализ процесса и построение кинограммы изменения газодинамических параметров в канале ГЖЭ без гидродинамической составляющей процесса (без учета подачи воды через форсунки). Развитие пакета, по информации разработчиков, идет в направлении учета гидродинамики. Задача решается в трехмерной постановке, в рамках модели «полностью сжимаемая жидкость». Математическая модель включает в себя уравнения Навье–Стокса, переноса турбулентной энергии диссипации и энергии. Количество ячеек составляет более 120 000. Получены кинограммы изменения температуры и векторов скорости потока.

На рис. 4 представлено векторное распределение скорости потока в газоходе стенда. На рис. 5 представлено распределение температуры потока в газоходе стенда.

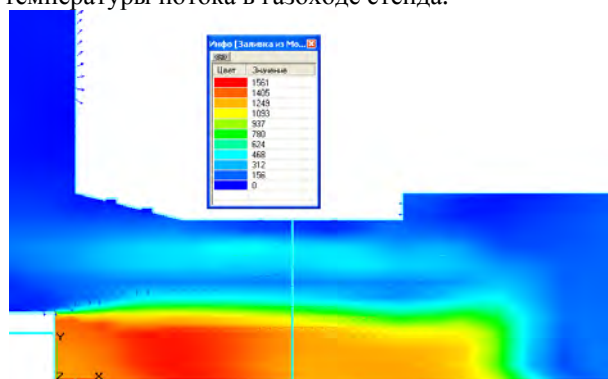


Рис. 4. Распределение скорости потока в газоходе стенда

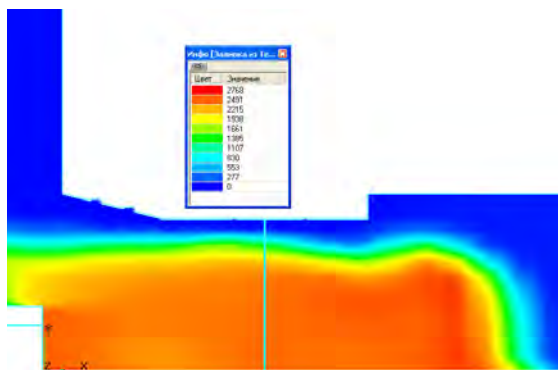


Рис. 5. Распределение температуры потока в газоходе стенда

Для предварительного (в статике) моделирования процесса в ГЖЭ применялся программный комплекс FLUENT. Анализ представленной выше расчетной схемы стенда, ранее проведенных натурных испытаний и особенностей функционирования стендовой установки позволили сформулировать физическую и математическую модели процесса:

Физическая модель:

- конструкция полагается трехмерной;
- задача решается в стационарной постановке;
- рабочее тело представляет собой идеальный сжимаемый газ;
- стенки канала – газо-гидронепроницаемая, теплопроводная поверхность.

Математическая модель:

- уравнение сохранения массы $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho W) = 0$;
- уравнение сохранения импульса $\frac{\partial}{\partial t}(\rho W) + \text{div}(\rho W W) + \text{div} P = 0$;

- уравнение сохранения энергии $\frac{\partial \rho}{\partial t} E + \text{div}(\rho E W) + \text{div}(\rho W) = 0$;
- уравнение состояния идеального сжимаемого газа $P = \rho(k-1)(E - W^2 / 2)$;
- уравнение переноса турбулентной вязкости

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = \\ = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_i} \right)^2 \right] - Y_v. \end{aligned}$$

Численным методом является метод конечных элементов. Расчетная область разбивается на конечное число подобластей. Они имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области (рис. 6). Конечно-элементная модель ГЖЭ имеет более 180 000 элементов и около 39 000 узлов.

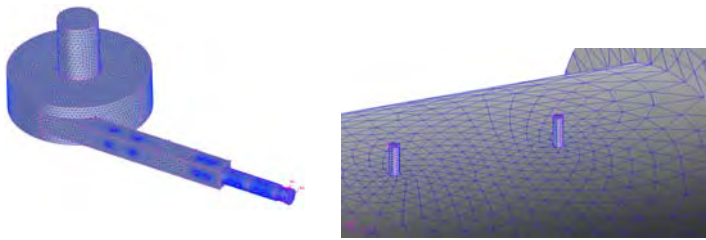


Рис. 6. Конечно-элементная модель стенда

Для нахождения параметров газового потока необходимо решить систему дифференциальных уравнений, дополненную необходимыми начальными и граничными условиями. Граничные условия задаются на всех поверхностях расчетной области (рис. 7). Высокотемпературная струя продуктов сгорания 1, вытекающая из РДТТ (задаются температура и массовый секундный расход газа), подсасывает в ГЖЭ 4 воздух 2 из атмосферы (температура 293 К, давление 0,1 МПа). Через форсунки 3, имеющие различные диаметры в каждой секции эжектора, осуществляется подача воды (задаются температура и массовый секундный расход воды) для охлаждения высокотемпературного потока продуктов сгорания. Процесс перемешивания осуществляется по всей длине камеры, затем газожидкостная смесь через газоход 5 поступает в сепаратор стенда (на выходе из утилизационного стенда образуется парогазовая смесь, температура смеси 293 К, давление 0,1 МПа). Материал стенки камеры – сталь, температура стенки 293 К, $\lambda_c = 16.27$ Вт/м·К.

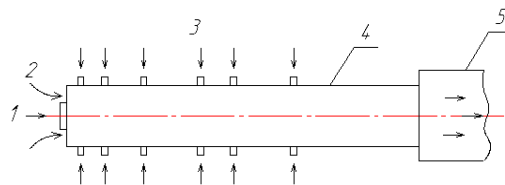


Рис. 7. Постановка граничных условий

В результате численного исследования процесса эжекции, определены следующие характеристики: поля скоростей, давлений, температур в канале газохода стенда.

Статические давления эжектирующего и эжектируемого газов на входе в камеру смешения одинаковы (рис. 8). При смешении газов и их движении вдоль цилиндрической части камеры эжектора статическое давление изменяется в пределах от 0,1027 МПа до 0,1162 МПа. Таким образом, при выравнивании поля скоростей в смесительной камере происходит возрастание статического давления; во входном сечении камеры наблюдается резкое понижение статического давления, а по мере прохождения смесью канала газохода статическое давление возрастает.

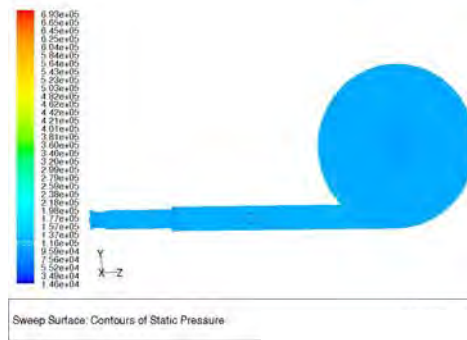


Рис. 8. Распределение статических давлений по сечению стенда

Полное давление смеси тоже изменяется от 0,1734 МПа до 0,1161 МПа (рис. 9). Вблизи входных штуцеров (там, где струя воды сталкивается с потоком продуктов сгорания) наблюдаются области повышенного полного давления.

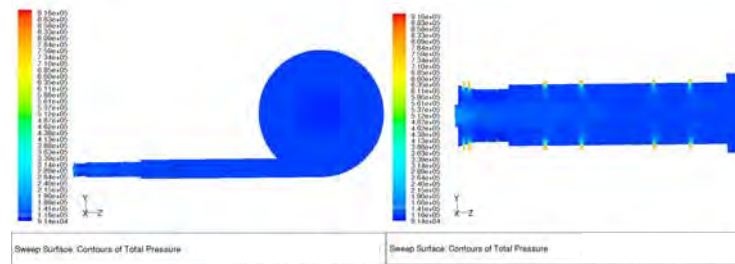


Рис. 9. Распределение полных давлений по сечению стенда

Значение температуры (рис. 10) изменяется от 293 К (температура подачи воды и эжектируемого газа – воздуха) до 2200 К (температура истечения продуктов сгорания в канал газохода стенда). За счет подачи воды и эжектируемого потока высокотемпературный поток продуктов сгорания отжимается от стенок газохода и теряет энергию. Значение температуры значительно уменьшается и в месте входа в улитку достигает 440 К. Температура на выходе из стенда составила 293 К. Подача воды и эжектируемого потока (воздух) также предотвращает перегрев стенок канала газохода. Температура стенок остается в пределах допустимых значений температуры стенок – 293–311 К.

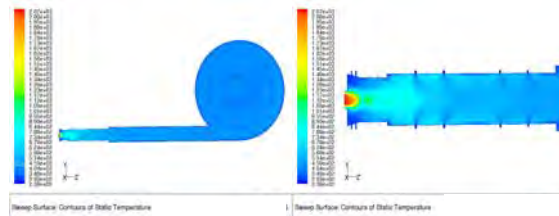


Рис. 10. Распределение поля температур по сечению стенда

Характер смешения потоков в основном участке газохода стенда определяет скорость газожидкостной смеси. В широком диапазоне начальных параметров газов она остается меньше скорости звука (рис.11). Скорость подачи продуктов сгорания равна 508 м/с. По мере удаления от входного сечения газохода скорость потока уменьшается до 80 м/с. С увеличением расстояния от входного сечения скорость потока снижается до 50 м/с. На выходе из утилизационного стенда скорость падает до 6 м/с.

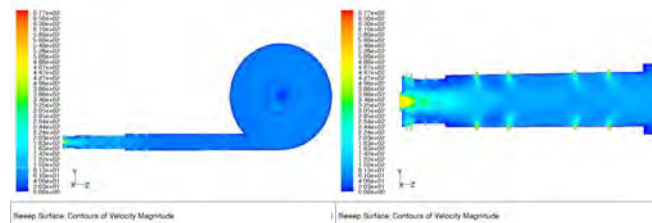


Рис. 11. Распределение скоростей по сечению стенда

Ввиду наличия поперечных и пульсационных компонентов скорости, свойственных турбулентному движению, потоки внедряются друг в друга, образуя постепенно уширяющуюся зону смешения – пограничный слой струи. Вне пограничного слоя в начальном участке газохода имеются невозмущенные потоки эжектируемого и эжектирующего потоков. Но при столкновении потоков газов со струями воды, которые подаются в перпендикулярном к потокам продуктов сгорания направлении, происходит турбулизация течения с образованием вихрей в местах пересечения потоков (рис. 12).

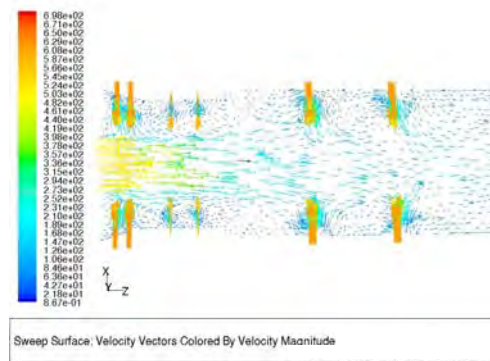


Рис. 12. Распределение вектора скорости по сечению сопла

Вычислительное моделирование процессов в канале газопотока сопла для утилизации РДТТ показало качественное совпадение полученных результатов с данными натурного эксперимента. Получены значения массовых секундных расходов, массовое соотношение воды и газа в газопотоке сопла. Программный комплекс позволяет выводить в качестве результатов: поля чисел Маха, плотности, давлений, температур и характеристики свойств рабочего тела.

Таким образом, представленные результаты и наработанная методика проведения вычислительного эксперимента дают возможность повысить точность прогнозирования процесса эжекции, расчета полей температур и давлений в газопотоке, исследовать области повышенных значений скоростей потока и возможность возникновения режимов заклинивания газопотока сопла.