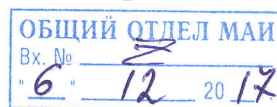


Отзыв

официального оппонента, кандидата технических наук, старшего научного сотрудника отдела аэрокосмических двигателей Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Арефьева Константина Юрьевича на диссертационную работу Заранкевича Ильи Андреевича «Численное и экспериментальное моделирование процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе применительно к испытаниям реактивных двигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

На этапе современного развития технологий создания аэрокосмических двигателей большую роль играют их испытания (как исследовательские, так и контрольные), реализуемые в условиях, максимально приближенных к натурным. При испытаниях реактивных двигателей важное место занимают высотные испытания, проводимые при пониженных давлениях окружающей среды. Создание высотных условий требует использования различных технических устройств, одним из которых являются жидкостно-газовые эжекторы. Преимуществами эжекторов является простота устройства, отсутствие движущихся частей, надежность большой срок эксплуатации, минимальные регламентные работы для технического обслуживания, возможность проведения длительных испытаний, высокая технологичность и производительность. Следует отметить, что при некоторых испытаниях реактивных двигателей требуется создавать высокую степень разрежения, что требует использования высокопроизводительных эжекторов, для которых массовый расход эжектирующего рабочего тела может быть на несколько порядков выше, чем эжектируемого газа. Поэтому повышение эффективности эжекторов является



важной задачей, которая не может быть решена без детального изучения сложных гидродинамических и газодинамических процессов в проточном тракте эжекторов. Учитывая это, решаемая в диссертационном исследовании научная задача совершенствования методик расчета и экспериментальная проверка результатов численного моделирования процессов в двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратах является **актуальной**.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых источников из 183 наименований, изложена на 101 страницах машинописного текста, включающего 60 иллюстраций и 2 таблицы.

Во введении автором надлежащим образом обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, отражена научная новизна, практическая значимость, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературных источников, посвященных исследованиям двухфазных жидкостно-газовых эжекторов с учетом применения в авиационной и ракетной технике, а также общей промышленности. Как было показано автором, в настоящее время отсутствует единая теория и стандартизованные методики расчета для жидкостно-газовых эжекторов. На основе анализа литературных источников, соискатель объясняет это сложностью процесса смесеобразования и неопределенностью свойств получаемой двухфазной смеси. В первой главе автор указывает, что использование газ-газовых эжекторов при испытаниях реактивных двигателей влечет за собой сложную инфраструктуру и необходимость в наличии больших запасов газового рабочего тела, что не всегда может быть реализовано в условиях испытательной базы. При использовании двухфазного эжектора существенно упрощается и уменьшается стендовый комплекс, затраты на его создание и обслуживание. Кроме того, интенсивное перемешивание газа с рабочей жидкостью в камере смешения создает условия для охлаждения и нейтрализации продуктов сгорания, а также снижает шумы от работы двигателя.

Вторая глава посвящена описанию математических моделей для численных расчетов характеристик жидкостно-газового эжектора с использованием программного пакета ANSYS CFX. В расчетах применена современная модель турбулентности SST $k - \omega$. Автором приведены основные результаты расчетно-теоретического исследования для модельной установки в диапазоне массовых расходов жидкости от 170 г/с до 275 г/с при постоянном давлении на входе около 2,7 МПа. Расчетными методами определены скорости двухфазного потока на различных расстояниях от среза форсунки и при различных массовых расходах жидкости. Величины скоростей потока находятся в диапазоне от 29 м/с до 41 м/с.

В третьей главе приводится схема и описание стенда, а также имеющихся в распоряжении соискателя средств диагностики для измерения параметров двухфазных потоков. Следует отметить, что автор использует современные диагностические комплексы для скоростной видеосъемки, измерения дисперсности потока методом малоуглового рассеивания, PIV метод измерения полей скоростей дисперсной фазы, теневой метод определения размеров дисперсной фазы. Приводятся результаты испытаний различных смесительных элементов. Получена характеристика максимального разрежения, создаваемого модельным эжектором. Полученное минимальное значение абсолютного давления на входе в эжектор составляет примерно 0,002 МПа при массовом расходе жидкости около 270 г/с. Выполнено сравнение расчетов с экспериментами, которое показало рассогласование не более 7 %.

На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что расчетная методика обеспечивает хорошее прогнозирование параметров рабочего процесса в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе. Автором обосновано применение предложенной методики и полученных результатов на ранних этапах проектирования жидкостно-газовых двухфазных эжекторов для стендов высотных испытаний ракетных и авиационных двигателей и их агрегатов.

Научная новизна оппонируемой работы заключается в следующем:

1. Проведен анализ применения жидкостно-газового струйного аппарата (ЖГСА) для высотных испытаний реактивных двигателей в сравнении с уже существующими ЖГСА и газ-газовыми струйными аппаратами.
2. Проведен анализ влияния взаиморасположения элементов эжектора на его производительность.
3. Проведен анализ влияния дисперсности рабочей жидкости смесительного элемента эжектора на удельные параметры ЖГСА.
4. Разработана методика численного моделирования рабочего процесса жидкостно-газового двухфазного эжектора в пакетах прикладных программ гидрогазодинамики с учетом параметров струи.
5. Проведена оценка погрешности экспериментальных данных и сравнение их с результатами численного моделирования процессов в двухфазном – жидкостно-газовом эжекторе.
6. Даны рекомендации по моделированию двухфазных ЖГСА для повышения эффективности проведения высотных испытаний реактивных двигателей и общепромышленного применения.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что применение полученных расчетных и экспериментальных данных позволяет снизить габариты и энергетические затраты струйных аппаратов при проведении испытаний реактивных двигателей. Проанализированы возможности использования прикладных программ ANSYS и модуля CFX для расчета двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратов. Использование пакетов программ прикладной гидрогазодинамики позволяет дополнить эксперимент и способствует более детальному изучению процессов в двухфазном эжекторе.

Апробация подтверждена участием автора с докладами по тематике работы на семи всероссийских и международных конференциях, а основные результаты диссертации ранее опубликованы в 3 рецензируемых журналах.

Полученные автором результаты **достоверны**, так как они являются

следствием обобщения расчетных и экспериментальных данных, полученных путем применения современных методов и средств исследования. В частности, достоверность полученных результатов подтверждается:

- использованием в работе фундаментальных законов и уравнений гидродинамики и газовой динамики;
- использованием современных, неоднократно апробированных методов численного анализа;
- соответствием результатов расчетных исследований полученным экспериментальным данным.

В автореферате диссертации в сжатой форме приводится суть исследования и основные полученные результаты.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. Используемая математическая модель для расчетов многофазного потока с объемной долей газовой фазы около 0,9 (как указано в тексте диссертации) имеет ряд недостатков, а в частности:

- не учитываются процессы полидисперсного распыла жидкости форсункой и последующего газодинамического дробления образовавшихся капель в высокоскоростном потоке;

- в тексте диссертации не представлен метод описания фазового перехода, имеющего место в процессе испытаний реактивных двигателей с использованием жидкостно-газового эжектора;

- не учтены зависимости теплофизических свойств газовой и жидкой фазы от температуры, что может снизить точность математического моделирования, особенно при высоких температурах на входе в эжектор.

2. В диссертации мало внимания уделено параметрическому расчетно-экспериментальному исследованию жидкостно-газового эжектора, а в частности, не исследовано влияние геометрических параметров проточного тракта, давления подачи эжектирующей жидкости, массового расхода, температуры и химического состава эжектируемого газа. Такое исследование было бы

целесообразно для оптимизации проточного тракта эжектора, уточнения конфигурации экспериментальных эжекторов и разработки рекомендаций для последующего внедрения.

3. На основе полученных данных автору следовало бы уточнить применимость жидкостно-газовых эжекторов для испытаний реактивных двигателей. Также автору следовало бы ограничить область применения полученных результатов. В частности, достигнутые им минимальные значения давлений на входе в эжектор не позволяют проводить испытания современных ЭРД, так как степень вакуумирования для их испытаний должна быть существенно выше. Кроме того, упомянутая автором возможность использования полученных результатов для устройств подачи компонентов топлива должна быть более детально проанализирована.

4. На графиках, где представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных, несмотря на то, что количественная разница не превышает 7 %, отчетливо прослеживаются различия в характере поведения некоторых зависимостей (для экспериментальных данных – с увеличением расстояния от среза скорость потока растет, а для расчетных - падает). Целесообразным представляется привести некоторое пояснение к данному факту.

5. Для удобства восприятия результатов диагностики двухфазных потоков в экспериментах желательным было бы привести дисперсное распределение капель для каждого эксперимента.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не влияют на основные результаты. Диссертация Заранкевича И.А. является законченной научно-квалификационной работой, включающей новые научные результаты, их обоснование и приложение к задачам испытаний реактивных двигателей. Цель работы достигнута.

Диссертация отвечает требованиям всех пунктов Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Заранкевич Илья

Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник

отдела аэрокосмических двигателей Федерального

государственного унитарного предприятия

«Центральный институт авиационного

моторостроения имени П.И. Баранова»,

кандидат технических наук

Арефьев Константин Юрьевич

« 30 » ноября 2017 г.

Подпись К.Ю. Арефьева удостоверяю:

Ученый секретарь Федерального

государственного унитарного предприятия

«Центральный институт авиационного

моторостроения имени П.И. Баранова»,

доктор экономических наук, доцент



Джамай Екатерина Викторовна

« 30 » ноября 2017 г.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Адрес: 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

Телефон: +7 (495) 362-49-50

E-mail: arefyev@ciam.ru

<http://www.ciam.ru/>

07.12.2017 *Т. Джамай*