

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОГО ДВУХФАЗНОГО ЭЖЕКТОРА СО СВЕРХЗВУКОВЫМ ПРОФИЛИРОВАННЫМ СОПЛОМ

© 2017

И. А. Лепешинский доктор технических наук, профессор;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
igorlepezh@yandex.ru

В. А. Решетников кандидат физико-математических наук, доцент;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
vresh031152@mail.ru

И. А. Заранкевич аспирант;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
zarankevich@yandex.ru

Рассмотрен двухфазный жидкостно-газовый эжектор со сверхзвуковым соплом, представлены результаты численного моделирования происходящих в нем процессов и формирования двухфазной струи. Экспериментально исследована структура двухфазного течения, сформированная эжектором, и поля скоростей дисперсной фазы. Также получены зависимости расхода эжектируемого газа при различных расходах рабочей жидкости и измерено разрежение, достигаемое эжектором. Эжектор обеспечивает работу системы, формирующей двухфазные высококонцентрированные газокпельные струи при различных расходах и давлениях рабочих тел. Установлено, что благодаря наличию воздуха в двухфазном рабочем теле двухфазная струя на выходе из эжектора разгоняется на начальном участке от среза, а затем тормозится. Приводятся результаты численного моделирования внутренних процессов в пакетах прикладных программ гидрогазодинамики ANSYS, протекающих в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе, на основе исследования малоразмерной модели. Приводятся характеристики энергетической эффективности полноразмерного струйного аппарата, сравнение её с промышленными образцами. Отражены перспективы применения жидкостно-газовых струйных аппаратов при высотных испытаниях реактивных двигателей и их агрегатов.

Двухфазный эжектор; сверхзвуковое сопло; двухфазный поток; дисперсная фаза; поля скоростей; ANSYS; CFX; PIV-метод.

Цитирование: Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 2. С. 164-171. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-164-171

Введение

В процессе создания и эксплуатации ракетных и авиационных двигателей и их агрегатов большое значение имеет подтверждение расчётных параметров при различных внешних условиях и режимах работы. Для моделирования работы агрегатов в реальных условиях проводятся многочисленные испытания и проверки. Один из важнейших видов испытаний – высотные (испытания агрегата при различных давлениях окружающей среды от вакуума до атмосферного). Подобные испытания имитируют поведение агрегатов и устройств при пониженном давлении и позволяют получить данные, недоступные при обычных (атмосферных) условиях работы двигателя. Разрежение применяется также при проверке кавитационного запаса насосных агрегатов и проверке герметично-

сти баковых систем. При испытаниях двигателей приходится работать с горячим газом, и механические вакуумные насосы при подобных испытаниях не используются. В настоящее время для обеспечения разрежения при высотных испытаниях применяются струйные аппараты – эжекторы. В некоторых случаях генератором рабочего тела эжектора может выступать и сам двигатель, но в основном используется жидкость. Использование жидкости позволяет не только увлечь за собой газ из вакуумной камеры, но и при необходимости охладить его. Также происходит снижение вредных выбросов за счёт пропускания отработанных газов через слой жидкости.

В настоящее время используются методики расчёта, основывающиеся на экспериментальных коэффициентах. Развитие инструментов компьютерного моделирования позволяет проводить численное моделирование двухфазных потоков с высокой точностью при низких материальных затратах. Совершенствование методик расчёта и экспериментальная проверка результатов численного моделирования процессов в двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратах является актуальной задачей.

Двухфазный жидкостно-газовый эжектор со сверхзвуковым соплом

В общем виде эжектор представляет собой струйный аппарат, ресурс которого это процесс эрозии отверстия под воздействием воды или газа и охлаждённых продуктов сгорания реактивных двигателей. Основными характеристиками вакуумных эжекторов и насосов являются: абсолютное давление в откачиваемом объёме, массовый или объёмный расход откачиваемого газа. Для оценки эффективности эжекторов применяется параметр – коэффициент эжекции, который представляет собой отношение массового расхода жидкости к массовому расходу эжектируемого газа. Объект исследования в работе рассматривается не только как устройство для создания вакуума, но и как устройство для смесеобразования, в частности для создания двухфазной струи с заданными параметрами.

Рассмотрим исследуемый модельный эжектор (рис. 1). Он состоит из струйной форсунки 1 с регулируемым проходным сечением, профилированной сверхзвуковой камеры смешения 2, трубки подачи воды – регулятора положения 3 форсунки 1 в эжекторе и патрубка подачи воздуха 4. Подвод жидкости в камеру смешения осуществляется струйной форсункой 1 с регулируемым проходным сечением. Проходное сечение регулируется для изменения расхода истекающей из форсунки жидкости. Регулировка производится перемещением центрального тела форсунки, в дальнейшем сокращённо называемого ЦТФ. Для регулировки количества воздуха, подаваемого в эжектор, форсунка 1 объединена с трубкой подачи жидкости 3 и образует центральное тело эжектора (в дальнейшем ЦТЭ). При перемещении ЦТЭ относительно оси эжектора происходит изменение проходного сечения на входе в сопло эжектора. Воздух, в свою очередь, подаётся в эжектор через патрубок 4, связанный напрямую с атмосферой.

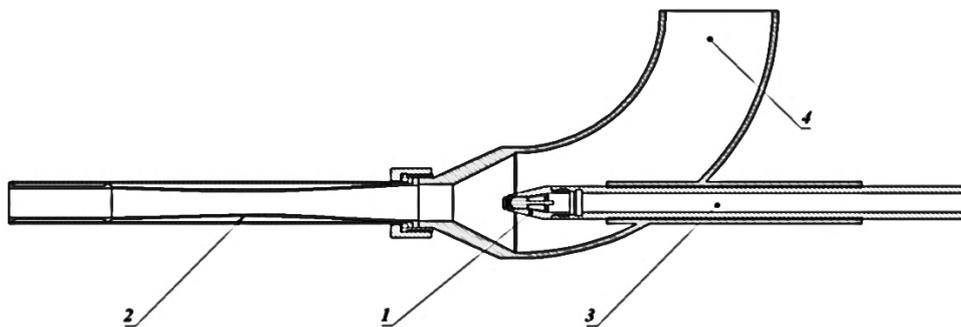


Рис. 1. Конструкция эжектора в сборе

При экспериментальном моделировании использовался стенд, предназначенный для исследования двухфазных газокпельных и пузырьковых течений. Стенд имеет гидравлическую магистраль для подачи жидкости (воды), систему измерения параметров на входе в ЦТЭ (давления, температуры и расходы). Применяемое в системе устройство для измерения массового расхода воздуха, которое предназначено для работы на разрежение, – BOSCH HFM-5 0280217123.

Эксперименты показали, что в ряде режимов работы эжектора абсолютное давление составило 0,01 атм., а при отборе воздуха при атмосферном давлении коэффициент эжекции достигал 20.

Результаты математического моделирования

Математическое моделирование эжектора производилось в пакете прикладных программ для математического моделирования ANSYS в модуле CFX [1]. В качестве граничных условий расчёта были заданы: полное давление жидкости на входе в ЦТЭ, статическое давление газа на входе в патрубок эжектора. Получены следующие параметры двухфазного эжектора: поля давлений и скоростей двухфазной рабочей смеси, расход воздуха на входе в эжектор, поля объёмных концентраций. При расчёте двухфазного потока применялась гомогенная модель. Математическое моделирование показало расхождение с экспериментами по скорости струи не более 5%, по расходу газа также не более 5%. На рис. 2 представлен результат расчёта в виде поля скоростей для жидкости при полном давлении на входе 27 атм.

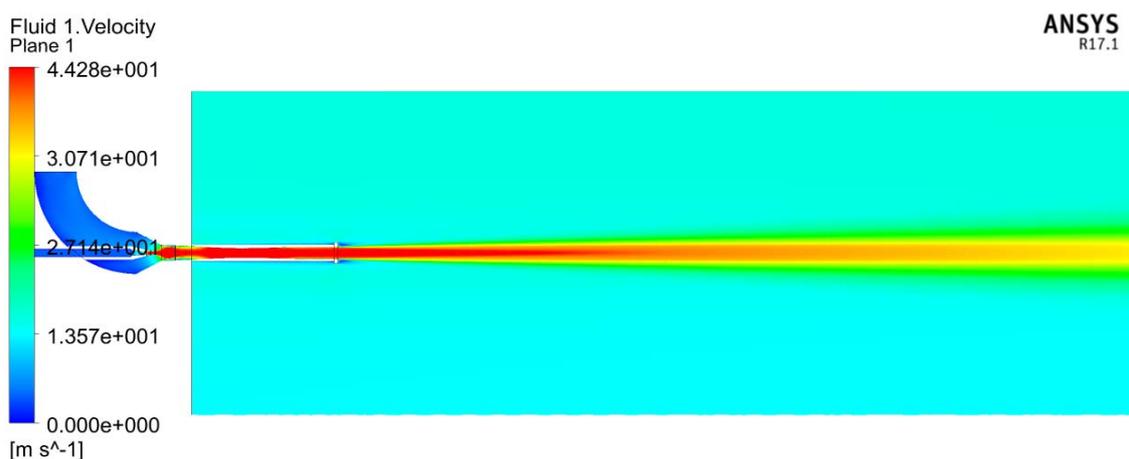


Рис. 2. Поле скоростей двухфазного эжектора

Результаты экспериментальных исследований

Во время исследований измерялись: поля скоростей дисперсной фазы, расходы жидкости и газа и разрежение, создаваемое эжектором.

Измерение полей скоростей. Измерение полей скоростей дисперсной фазы двухфазного потока проводилось PIV-методом (Particle Image Velocimetry – измерение скоростей (анемометрия) по изображению частиц) [2]. Наиболее часто изображение регистрируют при помощи импульсного лазерного «ножа», формирующего измерительный объём («световую плоскость» или лазерный «нож»).

Световая плоскость, которую образует лазерный «нож», в экспериментах имела размер 250×250 мм и была расположена вертикально. При этом горизонтальная ось, соответствующая оси потока, имеет обозначение X , а вертикальная – Y . Система может измерять скорости по оси Z , направление которой перпендикулярно «плоскости» лазерного «ножа». Толщина «плоскости» составляла 3-5 мм [3].

Система лазерных измерений, в основу которой положен PIV-метод, позволила по изображениям потока вычислить: линии тока и вектора скорости в пределах каждого элементарного объёма для каждой пары импульсов лазера; изображения полей скоростей и их проекций также для каждой пары импульсов лазера; графики проекций скоростей U и V как функций координат X и Y . При этом было выполнено осреднение как по пространству, так и по времени.

Поля продольной проекции скорости. После регистрации изображений с помощью программного обеспечения PIV-метода, разработанного фирмой LaVision, рассчитывались поля скоростей для каждой зарегистрированной области. Затем изображения полей скоростей сшивались по координатам X и Y , образуя общее продольное поле скоростей на расстоянии от среза форсунки до 900 мм (рис. 3).

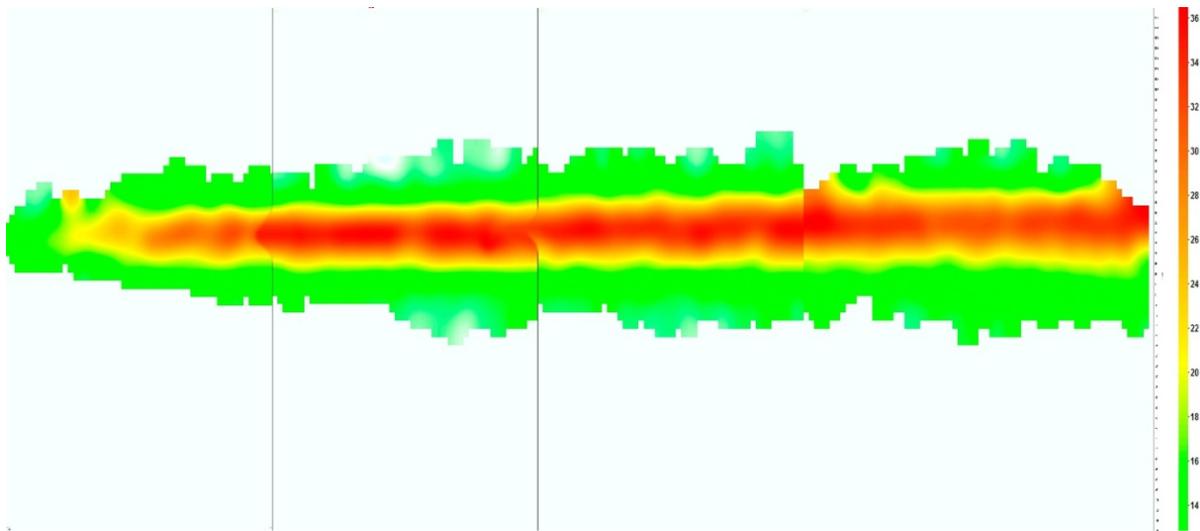


Рис. 3. Поле продольной проекции скоростей струи двухфазного эжектора на расстоянии от среза сопла до 900 мм, максимальная скорость 35 м/с

Осреднённые скорости. На рис. 4 и 5 приведены графики осевой проекции вектора средней скорости каплей U вдоль оси струи и в четырёх поперечных сечениях струи (для расстояний 0, 200, 400, 600 мм от среза сопла). Следует отметить (рис. 6), что скорость каплей увеличивается от 6 м/с (в начальном сечении) до максимального значения 33 м/с (на расстоянии 220 – 400 мм от среза сопла).

Данное явление потребовало проведения дополнительных экспериментов с высокоскоростной регистрацией двухфазной струи на начальном участке. Дополнительное исследование показало, что на малом расстоянии от среза сопла струя представляет собой неоднородный двухфазный поток, основная часть которого распространяется в пространстве с незначительной скоростью, а оставшаяся часть со скоростями, значительно превышающими среднюю скорость. По мере удаления от среза сопла двухфазный поток становится более однородным по своему дисперсному составу, а его скорость выравнивается (рис. 6).

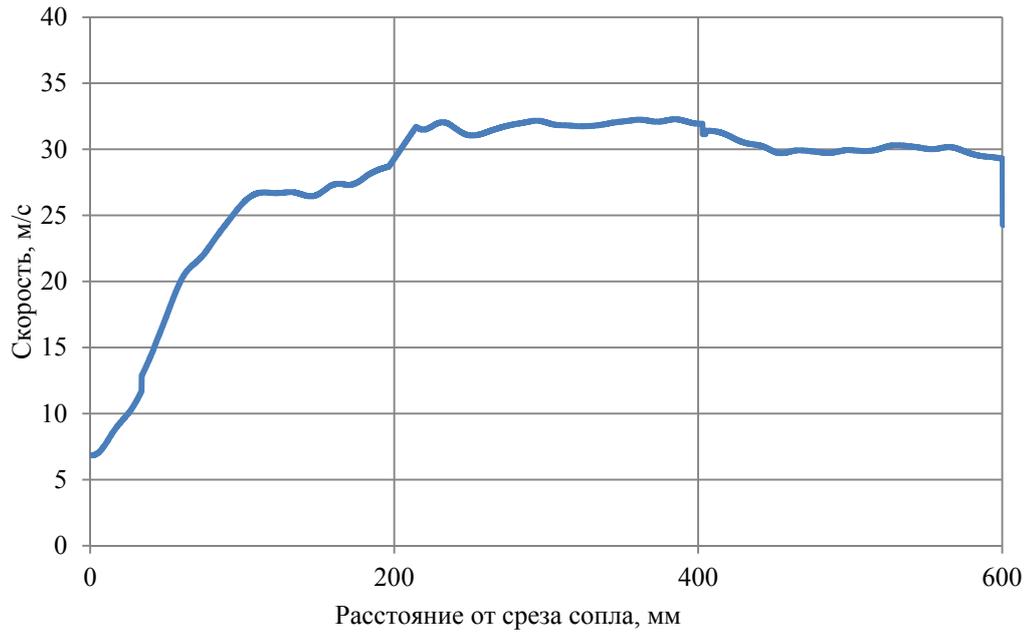


Рис. 4. Профиль U-проекции вектора средней скорости капель на ось X вдоль струи

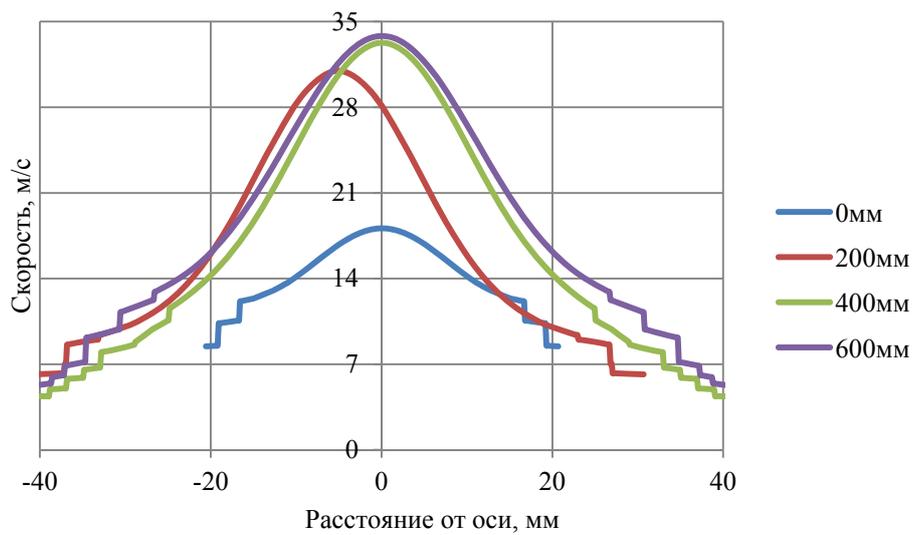


Рис. 5. Профили U-проекции вектора скорости капель на ось X в поперечных сечениях струи на расстояниях 0, 200, 400, 600 мм от среза сопла

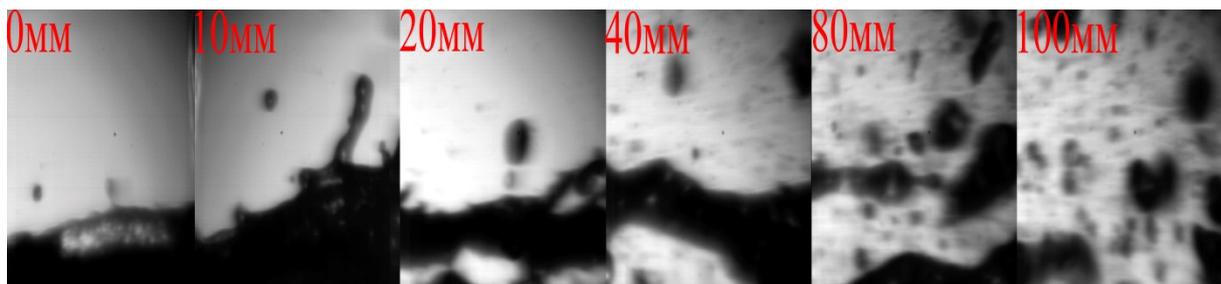


Рис. 6. Дробление периферийной части двухфазного потока

Абсолютное давление. В результате испытаний было измерено абсолютное давление при различном расходе жидкости. Замеры давления производились путём закрытия входа в эжектор и измерения абсолютного давления в откачиваемом объёме. Зависимость абсолютного давления от массового расхода жидкости приведена на рис. 7. Из него видно, что данный эжектор позволяет получить абсолютное давление 0,01 атм.

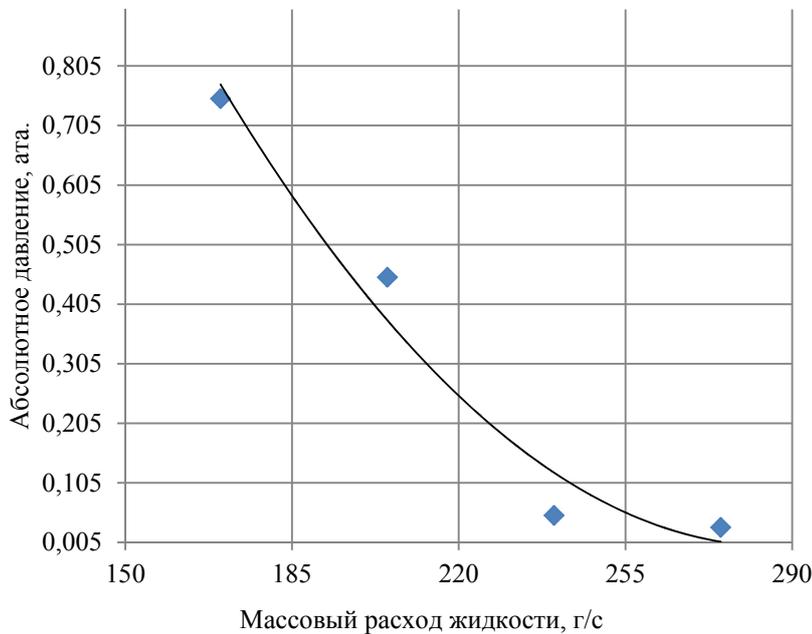


Рис. 7. Зависимость абсолютного давления от расхода жидкости в эжекторе

Энергетическая эффективность эжектора

Под энергетической эффективностью двухфазного жидкостно-газового эжектора следует понимать отношение полезной работы изменения давления газа от атмосферного давления до давления в откачиваемом объёме к затрачиваемой на создание определённых параметров жидкости (давление, расход) гидравлической мощности. Для оценки эффективности используется следующая формула:

$$\eta_{из}^{ж\ 2} = \frac{G_2 R_2 T_{c0} \ln \frac{P_{c0}}{P_{c0н}}}{H \rho_{ж} G_{ж} g}, \quad (1)$$

где $\eta_{из}^{ж\ 2}$ – изотермический КПД двухфазного жидкостно-газового эжектора; G_2 – массовый расход эжектируемого газа; R_2 – газовая постоянная; T_{c0} – температура газа; P_{c0} – абсолютное давление, создаваемое эжектором; $P_{c0н}$ – атмосферное давление; H – напор жидкости на входе в смесительный элемент; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; $G_{ж}$ – расход жидкости; g – ускорение свободного падения.

Зависимости энергетических характеристик модельного эжектора, промышленного эжектора и полноразмерного эжектора, спроектированного по разработанным методикам с применением пакетов прикладных программ гидрогазодинамики, приведены на рис. 8.

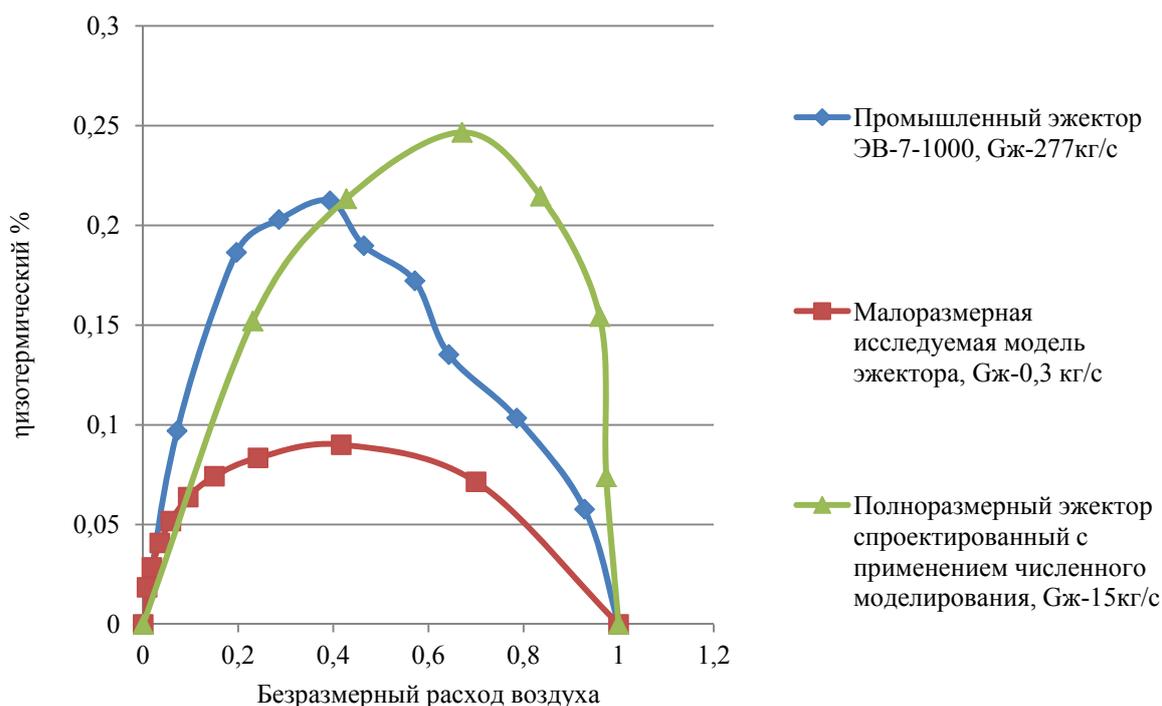


Рис. 8. Зависимость абсолютного давления от расхода жидкости в эжекторе

Заключение

Проведённое исследование разработанного жидкостно-газового эжектора с двухфазным рабочим телом выявило следующее:

- двухфазный поток на выходе из эжектора представляет собой сложную ускоряющуюся неоднородную структуру;
- наличие оптимального геометрического взаиморасположения элементов эжектора с максимальными удельными параметрами;
- возможность математического моделирования процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе с приемлемой точностью на базе гомогенной модели расчёта;
- возможность повышения эксплуатационных характеристик двухфазных эжекторов (снижение затрачиваемой энергетике, улучшение массогабаритных характеристик).
- предложенная конструктивная схема (по сравнению с известными [4]) позволяет достигать более низкого абсолютного давления в откачиваемом объёме при меньшем расходе жидкости, протекающей через эжектор.

Данные преимущества позволяют снизить расходы и повысить производительность устройств для создания вакуума при проведении высотных испытаний в авиационной и ракетно-космической отрасли.

Библиографический список

1. <http://www.ansys.com/>
2. Raffel M., Willert C.E., Wereley S., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Berlin: Springer, 2007. 448 p.
3. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А., Истомин Е.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А. Экспериментальное исследование газодинамического смесителя закрытого типа // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника,

технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 70-80. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-70-80

4. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Московский государственный технический университет, 2003. 408 с.

NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF A TWO-PHASE LIQUID- GAS EJECTOR WITH A PROFILED SUPERSONIC NOZZLE

© 2017

- I. A. Lepeshinsky** Doctor of Science (Engineering), Professor;
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation;
igorlepeh@yandex.ru
- V. A. Reshetnikov** Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor;
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation;
vresh031152@mail.ru
- I. A. Zarankevich** Postgraduate student;
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation;
zarankevich@yandex.ru

A two-phase liquid-gas ejector with a supersonic nozzle is described in the article. The results of numerical modeling of the processes occurring in it and forming a two-phase jet are presented. The structure of a two-phase flow formed by the ejector and the velocity field of the dispersed phase are experimentally investigated. The characteristic curves of the ejected gas flow for different values of the working fluid consumption are obtained and the rarefaction achieved by the ejector is measured. The ejector ensures the system's operation that forms two-phase high-concentration gas-droplet jets at different flow rates and pressures of working bodies. It is established that, due to the presence of air in a two-phase working body, a two-phase jet at the exit from the ejector accelerates in the initial section and then is decelerated. The results of the numerical modeling of internal processes occurring in a two-phase liquid-gas ejector are presented in fluid and gas dynamics ANSYS software application packages on the basis of analyzing a small-scale model. The characteristics of the energy efficiency of a full-size jet device are given, as compared to production prototypes. The prospects of using liquid-gas jet devices for high-altitude testing of jet engines and their units are indicated.

Two-phase ejector with supersonic nozzle; two-phase flow; dispersed phase; velocity field ; ANSYS ; SFX; PIV-method.

Citation: Lepeshinsky I.A., Reshetnikov V.A., Zarankevich I.A. Numerical modeling and experimental research of a two-phase liquid- gas ejector with a profiled supersonic nozzle. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 2. P. 164-171. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-164-171

References

1. <http://www.ansys.com/>
2. Raffel M., Willert C.E., Wereley S., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Berlin: Springer, 2007. 448 p.
3. Lepeshinsky I.A., Reshetnikov V.A., Zarankevich I.A., Istomin E.A., Antonovsky I.V., Guzenko A.A. Experimental research of the closed-type gas-dynamic mixer. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 70-80. (In Russ.) DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-70-80
4. Tsegel'skiy V.G. *Dvukhfaznye struynye apparaty* [Two-phase jet devices]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2003. 408 p.