

УДК 621.1.076-627.7

**В.Е. КОСТЮК, О.М. БУГАЕНКО, Ю.А. ГУСЕВ, А.В. СКЛЯРОВ**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОФАЗНОГО РАЗГОННОГО СОПЛА**

Рассмотрены вопросы проверки достоверности математической модели разгонного сопла многоцелевого генератора многофазного потока.

**многофазный поток, вычислительная аэрогидродинамика, газовый поток, дисперсная фаза, разгонное сопло, проточная часть, гидравлическое сопротивление**

Многофункциональный генератор многофазного потока (МГМП), описанный в [1 – 3], состоит из двух основных частей: газотурбинного двигателя и многофазного разгонного сопла. Математическая модель, описывающая процессы, происходящие в разгонном сопле, представлена в [1, 2]. С помощью программных продуктов [4], основанных на данной модели, возможно проведение проектировочных, поверочных расчетов, а также доводка разгонного сопла. Однако необходима верификация данной модели и проверка адекватности полученных результатов.

Для определения достоверности результатов, полученных с помощью предложенной модели, необходимо проведение комплекса экспериментов. На данный момент существует экспериментальная установка и проводится подготовка к проведению экспериментов. Однако проведение полной экспериментальной проверки связано со значительными материальными и временными затратами, кроме того экспериментально проверить целый ряд параметров крайне сложно. Поэтому возникает необходимость использовать современные методы вычислительной аэрогидродинамики для проверки полученных результатов.

Таким образом, целью данной работы является проверка результатов полученных с помощью математической модели описанной в [2, 3] с помощью современного пакета вычислительной аэрогидро-

динамики (ВАГД). Основными параметрами, определяющими эффективность работы многофункционального генератора, являются скорость дисперсной фазы и скорость, давление несущей фазы (газа), т.е. необходимо определить изменение основных параметров по длине сопла и сравнить с результатами, полученными с помощью предложенной математической модели.

При математическом описании многофазного течения в разгонном сопле принимались следующие основные допущения: течение несущей газовой среды квазистационарное, турбулентное, несжимаемое, изотермическое; объемной вязкостью пренебрегаем; частицы сферические; объемом, занимаемым частицами, пренебрегаем; турбулентность изотропная; турбулентное рассеивание частиц отсутствует; частицы не оказывают влияния на параметры турбулентности.

Многофазное течение моделировалась как двухфазная смесь с эйлеровым описанием газовой фазы (сплошная среда) и лагранжевым описанием движения частиц (траекторная модель). Взаимодействие фаз учитывалось на основе модели «частица – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие частицы в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы.

При сделанных выше допущениях поведение газовой фазы описывается системой дифференциаль-

ных уравнений в частных производных, состоящей из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и двух уравнений дифференциальной модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$  типа вида.

Движение и тепломассообмен дисперсной фазы рассматривалось в лагранжевом описании.

Траектории частиц моделировались путем интегрирования уравнения баланса сил, действующих на частицу, которое уравнивает инерцию частицы с силой аэродинамического сопротивления и силой тяжести.

Во время расчета траекторий частиц отслеживается импульс и энергия, следующих вдоль данной траектории частиц. Затем эти значения включаются в расчет непрерывной фазы. Таким образом, учитывается обратное влияние дискретной фазы на континуум. Это двухстороннее межфазное взаимодействие учитывается поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

При моделировании дискретной фазы задаются начальные условия для частиц: положение частицы; ее скорость; диаметр; массовый расход частиц, следующих вдоль траектории. Предполагается, что при столкновении со стенкой частица захватывается ею.

Решение отыскивалось в двумерной расчетной области, соответствующей проточной части разгонного сопла. Расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой.

Для доверия к результатам расчета методом ВАГД сравним значение коэффициента гидравлического сопротивления со значением, полученным аналитическим методом. Коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле:

$$\zeta = \zeta_m + \zeta'_{mp},$$

где  $\zeta_m$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления;

$\zeta'_{mp}$  – коэффициент сопротивления трения.

Коэффициент местного гидравлического сопротивления в случае распределения скоростей на вхо-

де по степенному закону

$$\frac{w}{w_{\max}} = \left(1 - \frac{y}{R_0}\right)^m,$$

где  $w$  и  $w_{\max}$  – соответственно скорость в данной точке и максимальная скорость по сечению;

$R_0$  – радиус сечения;

$y$  – расстояние от оси;

$m$  – показатель степени, который может меняться в пределах от 1 до  $\infty$ :

$$\zeta_m = 1 + N - 2M,$$

где  $M$  – коэффициент количества движения потока:

$$M = \frac{(2m+1)^2(m+1)}{4m^2(m+2)};$$

$N$  – коэффициент кинетической энергии потока:

$$N = \frac{(2m+1)^3(m+1)^3}{4m^4(2m+3)(m+3)}.$$

Коэффициент сопротивления трения определяется по формуле:

$$\zeta'_{mp} = \frac{\lambda \ell}{D},$$

где  $\ell$  – длина сопла;

$D$  – гидравлический диаметр;

$\lambda$  – коэффициент трения труб с гидравлически гладкими стенками.

Проведя вычисления, получим значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta = 0,02296$ .

С другой стороны:

$$\zeta = 2 \cdot \frac{p_0^* - p_2^*}{\rho w_0^2},$$

где  $p_0^*$  и  $p_2^*$  – среднemasовые значения полного давления в начальном и конечном сечениях;

$\rho$  – плотность;

$w_0$  – среднemasовая скорость в начальном сечении.

То есть, для ВАГД расчета,  $\zeta = 0,02237$ .

Таким образом, различие значений гидравлических сопротивлений составляет 2,6%, что свидетельствует о достоверности полученных методами ВАГД решений и о возможности использования данных результатов для верификации математической модели МГМП.

Графическое представление полученных полей скоростей и давлений, а также траектории частиц дисперсной фазы представлены на рис. 1 – 3 соответственно.

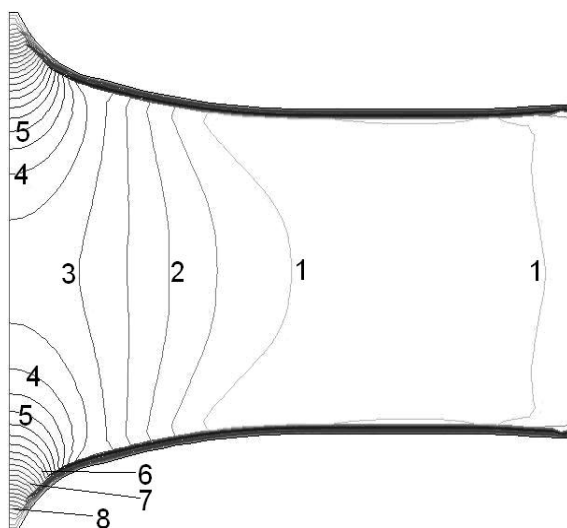


Рис. 1. Изолинии скорости:  
1 – 406м/с; 2 – 378м/с; 3 – 350м/с; 4 – 322м/с;  
5 – 294м/с; 6 – 238м/с; 7 – 128м/с; 8 – 70м/с

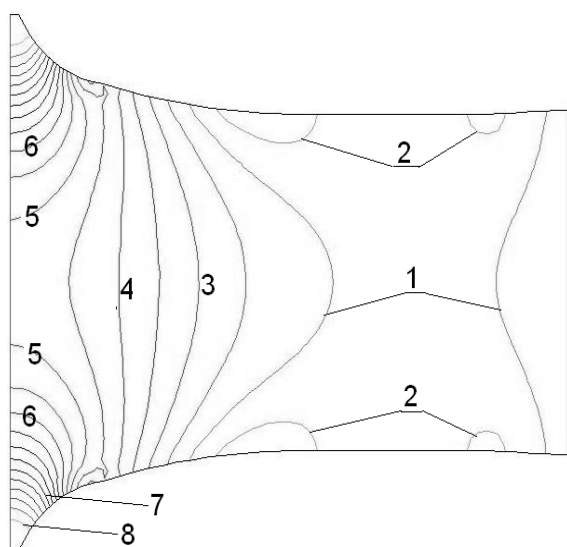


Рис. 2. Изолинии давления:  
1–98,8кПа; 2–93,1кПа; 3–110,2кПа; 4–121,5кПа;  
5–132,9кПа; 6–144,2кПа; 7–166,9кПа; 8–195,3кПа

В виду того, что проверяемая модель квазиодномерная, а результаты методами ВАГД были получены в двумерной области, необходимо значения скоростей газа, дисперсной фазы и давления в сечениях усреднить. Значения основных параметров, полученных методами ВАГД, брались среднemasовые в сечениях 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5 м.

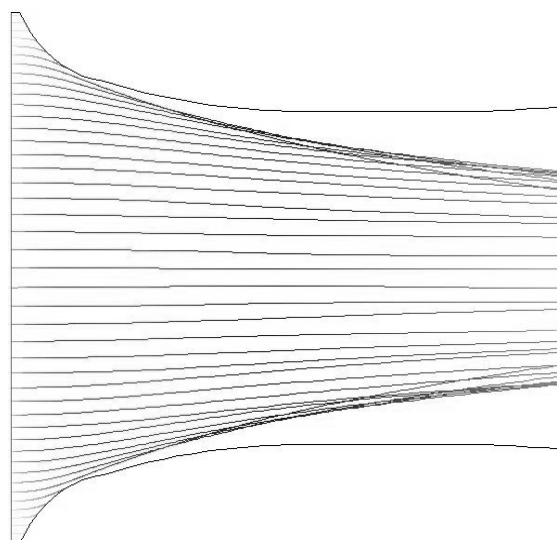


Рис. 3. Траектории частиц

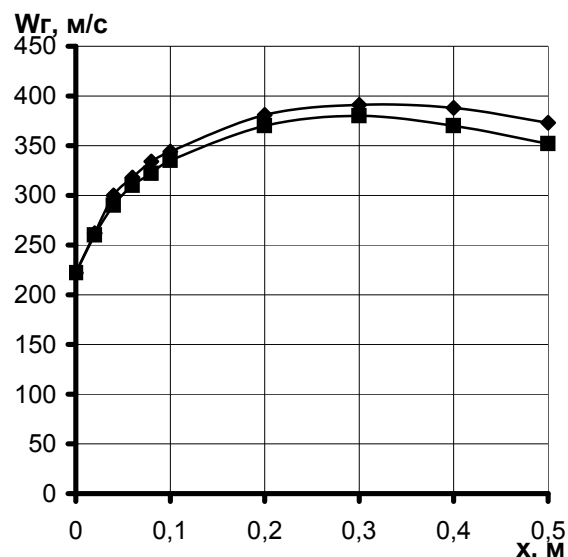


Рис. 4. Изменение скорости газа:  
■ ■ ■ – результаты ВАГД  
◆ ◆ ◆ – результаты МГМП

Графики изменения основных параметров представлены на рис. 4 – 6. Как видно из графиков характер изменения скорости дисперсной фазы, полу-

ченный методами ВАГД и с помощью математической модели МГМП, одинаковый, при этом максимальное отклонение значений составляет 10% (или в абсолютных значениях 9 м/с). Характер изменения скорости и давления газа по длине сопла также совпадает для обоих вариантов расчета, а максимальное отличие значений составляет 4,6% (18 м/с) для скорости газа и 11,9% (14 кПа) для давления.

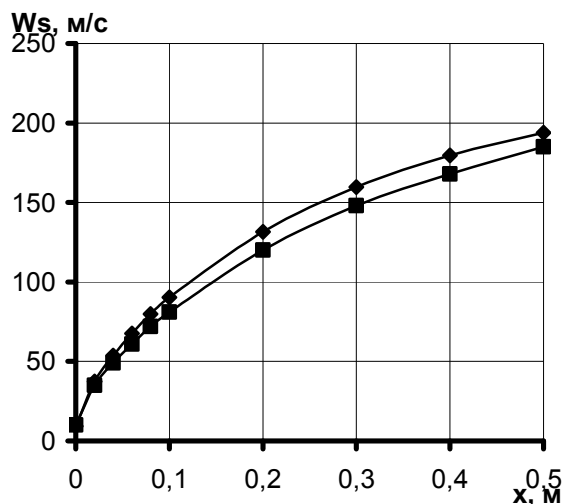


Рис. 5. Изменение скорости дисперсной фазы:

■ ■ ■ – результаты ВАГД  
◆ ◆ ◆ – результаты МГМП

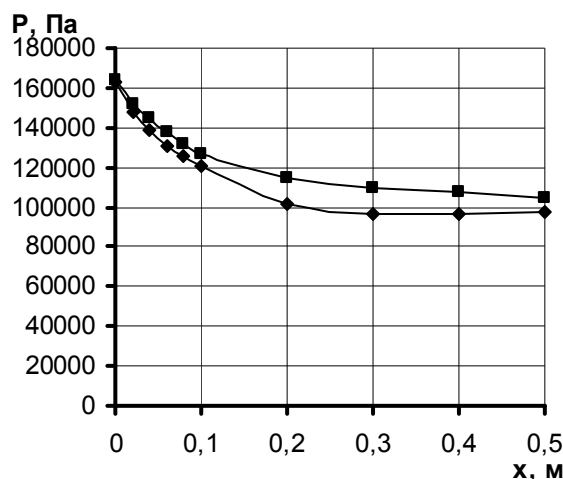


Рис. 6. Изменение давления газа:

■ ■ ■ – результаты ВАГД  
◆ ◆ ◆ – результаты МГМП

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод об адекватности предложенной в [2] математической модели многофазного разгонного устройства. Однако очевидна необходимость проведения экспериментального исследования.

## Литература

1. Романенко В.В., Селиванов В.Г. Газодинамическая модель процесса образования газожидкостного потока капельной структуры // Газодинамика двухфазных потоков в энергоустановках. – Х.: ХПИ, 2002. – Вып. 7. – С. 55-66.
2. Елифанов С.В., Бугаенко О.М., Гусев Ю.А., Скляр А.В. Математическое моделирование многофункциональных генераторов трехфазных потоков на базе авиационных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 8 (24). – С. 58-61.
3. Расчет дальности двухфазной струи пожаротушащей установки на базе газотурбинного двигателя / В.С. Чигрин, Ю.А. Гусев, С.В. Елифанов и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 1999. – Вып. 14. – С. 18-20.
4. Бугаенко О.М., Зеленский Р.Л., Скляр А.В. Программная реализация математической модели многофункционального генератора трехфазного потока на базе авиационного ГТД // Международная НТК ИКТМ'2005: тезисы докладов конференции. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2005. – С. 119-120.

Поступила в редакцию 17.05.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор В.Е. Вель, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.