

УДК 621. 1. 076 - 627. 7

С.В. ЕПИФАНОВ, О.М. БУГАЕНКО, Ю.А. ГУСЕВ, А.В. СКЛЯРОВ

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

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ТРЕХФАЗНЫХ ПОТОКОВ НА БАЗЕ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Рассмотрены вопросы математического моделирования многофазных многофункциональных генераторов, позволяющих решать различные экологические задачи.

**многофазный поток, дисперсная система, газодинамическое дробление, газовый поток, диспергирование, адсорбирование, проточная часть, поверхностное натяжение, термогазодинамическая модель**

Предлагаемый многофункциональный генератор трехфазного потока (МГТП) *предназначен* для улучшения экологической ситуации в зоне чрезвычайной обстановки, связанной с разливом нефтепродуктов, а также для эффективной борьбы с пожарами, решения задач пылеподавления, дегазации и дезактивации техники, а также промышленных и гражданских сооружений. МГТП может быть применен также для нанесения защитных покрытий на основе полиэтилена или полиуретана на обширные поверхности технических объектов [1, 5, 6, 7].

В состав многоцелевой установки входят следующие модули:

- газотурбинный двигатель (ГТД);
- многофазное выходное устройство.

Задача ГТД – формирование газового потока с заданными параметрами в выходном устройстве.

Математическая модель многофункционального генератора трехфазного потока включает в себя математические модели (ММ) ГТД и модель трехфазного разгонного устройства. В совместной модели ГТД и разгонного сопла (рис. 1) параметры газовой струи двигателя, полученные с помощью ММ, являются исходными данными для модели разгонного сопла.

В модель МГТП введена обратная связь, учитывающая влияние сопла на рабочий процесс двигателя. В рамках данной статьи не ставилась задача

представления совместной модели ГТД и сопла.

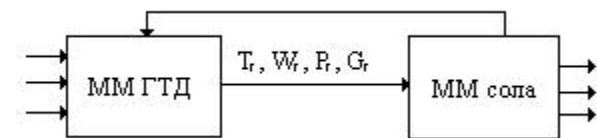


Рис. 1. Схема совместной модели ГТД и разгонного устройства

Целью данной работы является разработка ММ трехфазного сопла, создание на ее основе программного продукта и проведение поверочных расчетов, позволяющих дать физическую оценку полученным результатам.

Трехфазный поток в выходном устройстве формируется газовым потоком двигателя, твердыми частицами и жидкостью. При решении задачи сбора нефтяной пленки, с водной поверхности, в качестве твердой фазы могут рассматриваться частицы пористых материалов, обладающих эффектом адсорбции (например, обычная деревянная стружка).

Для обеспечения дальнобойности такого потока вводится небольшое количество жидкой фазы, позволяющей увеличить его импульс.

В разгонном устройстве (рис. 2) на участке 0–1 осуществляется подача твердой фазы и впрыск жидкой, а также их равномерное перемешивание.

На участке 1–2 происходит разгон твердой фазы, что позволяет обеспечить распределение твердой фазы на большей поверхности и на значительном

удалении от среза сопла. Параметры газового потока, необходимые для осуществления дробления жидкой фазы и разгона твердых частиц, могут быть определены из предположения, что введение дополнительных фаз не влияет на изменение газодинамических параметров потока в проточной части ГТД, так как объемные расходы жидкой и твердой фазы малы по сравнению с расходом газа.

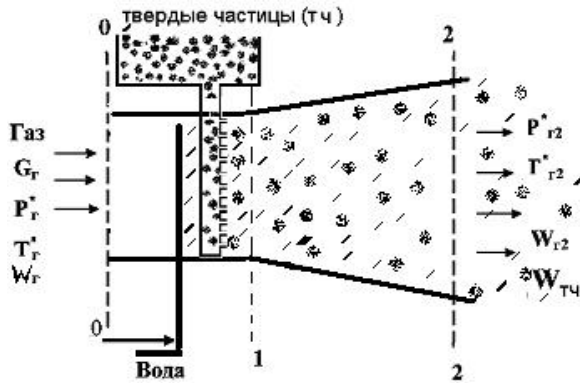


Рис. 2. Схема разгонного трехфазного устройства

Процессы, происходящие на участке 1–2, описываются системой уравнений, полученной добавлением уравнений для твердой фазы к системе уравнений расчета двухфазного (газожидкостного) сопла [1, 3, 4, 5].

Задача проектирования трехфазного выходного устройства должна обеспечивать необходимую объемную концентрацию дисперсной фазы и дальность бойности потока.

Математическая модель выходного устройства содержит дифференциальные уравнения, выражающие законы: сохранения энергии смеси, массы и количества движения каждой фазы; уравнения притока тепла к жидкой и твердой фазам; уравнения состояния фаз и вспомогательные соотношения.

Эти уравнения формируются при следующих допущениях: течение смеси в сопле квазистационарное; поток энергоизолирован, массообмен между жидкостью и газом отсутствует; статическое давление в жидкости и газе одинаково; влияние вязкости газа сказывается только в окрестности дисперсных фаз и стенок канала; газ термически и каллорически

совершенен, жидкость не сжимаема, твердые частицы имеют сферическую форму, твердая и жидкая фазы не взаимодействуют непосредственно между собой.

Уравнения закона сохранения масс и энергии, а также уравнение состояния смеси имеют вид:

$$m_k = \rho_k W_k f_k; \quad m_z = \rho_z W_z f_z; \quad m_s = \rho_s W_s f; \quad (1)$$

$$f = f_z + f_k + f_s;$$

$$m_z \left( C_p T_z + \frac{W_z^2}{2} \right) + m_k \left( C_k T_k + \frac{W_k^2}{2} + \xi \frac{P}{\rho_k} \right) + m_s \left( C_s T_s + \frac{W_s^2}{2} + \xi \frac{P}{\rho_s} \right) = Const.$$

Уравнения сохранения количества движения фаз:

$$m_z dW_z = -f_z dP - dX_k - dX_{mz} - dX_s;$$

$$m_k dW_k = -\xi f_k dP + dX_k - dX_{mk}; \quad (2)$$

$$m_s dW_s = -\xi f_s dP + dX_s - dX_{ms}.$$

Уравнения притока тепла к жидкой и твердой фазам:

$$C_j \rho_j d_j dT_j = \alpha_j (T_z - T_j) \frac{dx}{W_j}, \quad (3)$$

где  $j = k$  – жидкая фаза,  $s$  – твердая фаза.

Коэффициент аэродинамического сопротивления капли определим по зависимостям:

$$C_k = \frac{24}{Re_k} + \frac{2,5}{Re_k^{0,25}}, \text{ если } Re_k \leq 4,55 A^{0,21},$$

$$\text{иначе } C_k = 0,73 Re_k^{1,4} A^{-0,4},$$

$$\text{где } Re_k = \frac{\rho_z |W_z - W_k| d_k}{\mu_z}, \quad A = \frac{\sigma_k^3 \rho_z^2}{g(\rho_k - \rho_z) \mu_z^4}.$$

Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления твердой частицы воспользуемся зависимостями, предложенными в [2]:

$$\text{при } Re_s = 10^{-4} \div 1, \quad C_{s1} = \frac{24}{Re_s};$$

$$\text{при } Re_s = 10 \div 10^3, \quad C_{s1} = \frac{13}{\sqrt{Re_s}};$$

$$\text{при } Re_s \geq 10^3, \quad C_{s1} \approx 0,48,$$

$$\text{где } Re_s = \frac{\rho_z |W_z - W_s| d_s}{\mu_z}.$$

В работах [2, 3] рассматриваются твердые частицы только сферической формы. Однако в ряде прак-

тических задач форма твердой частицы может сильно отличаться от сферической. Для несферических частиц практически невозможно вывести общих закономерностей для определения коэффициента аэродинамического сопротивления, однако факт отличия формы от сферической необходимо учитывать. Для приближенного учета аэродинамического несовершенства твердых частиц мы ввели поправочный коэффициент  $k_\phi$  (определяемый экспериментально), тогда:  $C_s = k_\phi \cdot C_{s1}$ .

Силы межфазного трения определим по зависимостям

$$dX_j = \frac{3}{4} C_{xj} \frac{\rho_z}{\rho_j} (W_z - W_j) \cdot |W_z - W_j| \frac{dx}{W_j d_j} \quad (4)$$

Сила трения каждой компоненты о стенки сопла

$$dX_{mj} = 2C_{fj} m_j W_j \frac{dx}{D}, (j = s, k, z), \quad (5)$$

где гидравлический диаметр канала вычисляем по формуле

$$D = 2a_3 \sqrt{f/\pi} + (1 - a_3) 2f / (f/b + b). \quad (6)$$

Коэффициент  $a_3$  определяет форму канала (при  $a_3 = 1$  – круг, при  $a_3 = 0$  – плоский канал шириной  $b$ ).

Коэффициент теплоотдачи капли жидкости найдем по зависимости [1]:

$\alpha_z = Nu \cdot \lambda_z / d_k$ , где  $Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}$ ,  
а для твердой частицы [3]:

$$\alpha_s = Nu \cdot \lambda_z / d_s, \text{ где } Nu = 2 + 0,16 Re_s^{0,6}.$$

Для решения приведенной выше системы уравнений необходимо задать еще одно – замыкающее уравнение.

При проектировании разгонного устройства возможны разные варианты задания этого уравнения. Так, в работе [1] используется закон изменения проскальзывания фаз по длине сопла в виде

$$W_z - W_k = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad (7)$$

а в работе [4] закон распределения давления в сопле в виде

$$P = ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad (8)$$

причем в обоих случаях коэффициенты  $a, b, a_1, a_2$  принимались равными нулю. Возможно использование и других замыкающих уравнений. В данной работе нами предложены замыкающие уравнения в виде:

$$W_z - W_s = a_0 \text{ и } P = cx + d. \quad (9)$$

Полученная система уравнений решалась численным методом Рунге – Кутты. В качестве переменной интегрирования выбрано статическое давление  $P$ .

Предлагаемая математическая модель разгонного устройства была реализована в виде программы, выполненной на языке Delphi.

С использованием описанной выше математической модели были выполнены варианты расчетов эффективности действия разгонного устройства для разных видов замыкающих уравнений, в ходе которых менялись:

– соотношения массовых расходов твердой фазы и газа  $U = m_s / m_z$ ;

– степень расширения газа  $p = P_{z0}^* / P_{cp}$ , где  $P_{cp}$  – давление на срезе сопла;

– длина сопла задавалась из необходимости оценки физической работоспособности математической модели устройства.

В качестве источника газового потока были выбраны газотурбинные двигатели ТР3-117 и АИ9-В.

На рис. 3 изображены зависимости скорости твердой частицы на выходе из сопла от длины сопла. Кривые изменения скорости показывают, что увеличение длины сопла, при прочих равных условиях, до определенного предела способствует увеличению скорости твердой частицы, а после с увеличением длины сопла скорость твердой частицы начинает падать.

При увеличении коэффициента инжекции твердой фазы скорость частиц (при использовании закона распределения давления по длине сопла) уменьшается (рис. 4), в то время как при замыкающем уравнении (7) сначала незначительно растёт, а после начи-

нает уменьшаться. При этом с увеличением коэффициента инжекции разница в скоростях твердой частицы при первом и втором замыкающем уравнении уменьшается, пока не становится равной нулю.

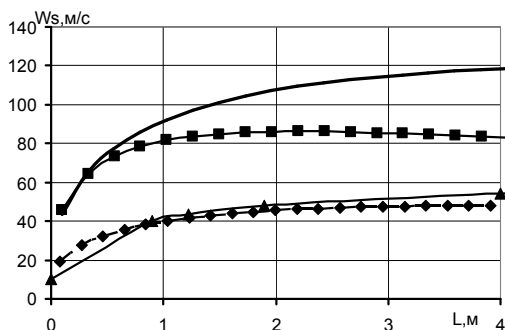


Рис. 3. Влияние длины сопла на скорость твердой частицы — для замыкающего уравнения (9): — ТРЗ-117; ■■■ — АИ9-В (рабочее тело из-за компрессора); ◆◆◆ — АИ9-В (рабочее тело из-за турбины); — для уравнения (7) ▲▲▲ — АИ9-В (рабочее тело из-за турбины)

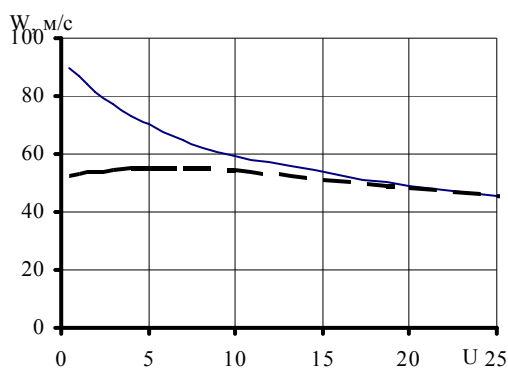


Рис. 4. Зависимость скорости твердой частицы от коэффициента инжекции при замыкающих уравнениях: — (9) и - - - (7)

Таким образом, закон изменения проскальзывания фаз, используемый в двухфазных разгонных устройствах, явно уступает в обеспечении максимальной скорости твердой частицы закону изменения давления по длине сопла.

С другой стороны, при больших коэффициентах инжекции выбор замыкающего уравнения по критерию эффективности разгона твердой частицы затруднен и требует дополнительных исследований.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что полученная математическая модель

трехфазного сопла работоспособна и может быть применена в совместной модели с газотурбинным двигателем.

### Литература

1. Романенко В.В., Селиванов В.Г. Газодинамическая модель процесса образования газожидкостного потока капельной структуры // Газодинамика двухфазных потоков в энергоустановках. — Х.: — Вып.7. — С. 55 – 66.
2. Венедиктов В.Д. Турбины и реактивные двигатели на двухфазных потоках. — М.: Машиностроение, 1969. — 196 с.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред — М.: Наука, 1987. — 678 с.
4. Лепшинский И.А. Теоретическое исследование течения в сопле с двухфазным рабочим телом // Теплофизика высоких температур. — 1974. — Т.12, №3. — С. 578 – 584.
5. Гусев Ю.А., Чигрин В.С., Елифанов С.В. и др. Мобильный генератор многофазного мелкодисперсного потока для тушения пожаров, дымоподавления и дезактивации на основе конверсионного использования авиационных газотурбинных двигателей // Прогресс Технология Качество. Тр. 2-го конгресса. — Х., 1997. — С. 268 – 274.
6. Чигрин В.С, Гусев Ю.А., Елифанов С.В.и др. Расчет дальности двухфазной струи пожаротушающей установки на базе газотурбинного двигателя // Авиационно-космическая техника и технология. — Х.: Гос. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 1999. — Вып. 14. — С. 18 – 20.
7. Лепшинский И.А Новая технология получения газочапельной струи и системы пожаротушения на ее основе // Конверсия машиностроения. — Россия, 2005. — С.117 – 123.

Поступила в редакцию 2.06.2005

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