

*Посвящается памяти учителя  
доктора технических наук, профессора  
Щербакова Алексея Алексеевича*

## **Особенности расчета системы подачи псевдоожигенного металлического горючего в режиме заторможенного плотного слоя**

© Ю.Н. Власов, О.Е. Шацкий

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлены результаты исследований, проведенных в целях изучения режимов течения псевдоожигенных порошкообразных металлических горючих (ПМГ), особенностей работы распыливающих ПМГ форсунок. Разработана методика расчета систем подачи псевдоожигенных порошковых материалов. Результаты исследований могут быть использованы при разработке опытных образцов силовых и энергетических установок, работающих с применением порошкообразных металлов.*

*Ключевые слова: двигатель, порошкообразные металлы, псевдоожигение, пневмотранспорт, потери давления, несущий газ.*

Перспективный тип топлива для энергосиловых установок, в том числе подводных аппаратов, — гидрореагирующее топливо, в котором в качестве горючего используются порошкообразные металлы (Mg, Al, В и др.), размещаемые на борту аппарата, а окислителем служит забортная вода. Добавляя в качестве горючего порошкообразные металлы (ПМ), можно повысить температуру продуктов сгорания жидкостного ракетного двигателя. Наибольшее применение среди ПМ получил алюминий, активно взаимодействующий с водой (водяным паром). При этом требуется решать проблему подачи ПМ в зону высоких температур и давлений в камере сгорания.

Транспортировку порошкообразного металлического горючего (ПМГ) по трубопроводам от расходного бака до распыливающих элементов камеры сгорания можно осуществлять с некоторой массой несущего газа для псевдоожигения, в качестве которого предпочтительно использование газов, не реагирующих с ПМ и обладающих максимальной работоспособностью. Из всех существующих режимов течения псевдоожигенных ПМГ наиболее стабилен режим

течения с минимальным расходом транспортирующего газа. Этот режим принято называть течением в режиме заторможенного плотного слоя (ЗПС). В технике такой режим можно обеспечить с помощью тормозящего насадка, который должен устанавливаться на конце подводящего трубопровода. В качестве тормозящего насадка можно использовать распыливающие устройства камеры сгорания, при этом для повышения энергетической эффективности такого способа подачи требуется предельное увеличение массовой концентрации движущегося ПМГ.

Важное отличие такой системы подачи псевдооживленного ПМГ — устойчивый режим его течения по подводящему трубопроводу. В работе [1] изложены результаты исследований, проведенных в целях изучения режимов течения псевдооживленных ПМГ различного типа и особенностей работы распыливающих ПМГ форсунок. Полученные результаты позволили создать методику расчета системы подачи псевдооживленного ПМГ в камеру сгорания ракетных двигателей.

При течении псевдооживленного ПМГ в режиме ЗПС необходимо учитывать некоторые особенности. За основу физической модели при таком течении был принят нелинейный закон фильтрации газов в пористых средах [2]. Потери давления псевдооживляющего газа по длине трубопровода  $\Delta P_1/\Delta l$  при фильтрации через неподвижный слой ПМГ определяли по уравнению

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta l} = 72\varphi \left[ \mu_{\Gamma} V_{\Gamma} \frac{(1-\varepsilon)^2}{d_{\Gamma}^2 \varepsilon^3} + V_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma} \frac{1-\varepsilon}{120 d_{\Gamma} \varepsilon^3} \right], \quad (1)$$

где  $\Delta P_1$  — перепад давления газа, Па;  $\Delta l$  — длина участка трубопровода, м;  $\varphi$  — гидродинамический коэффициент слоя ПМГ;  $\mu_{\Gamma}$  — коэффициент динамической вязкости несущего газа;  $V_{\Gamma}$  — скорость фильтрации псевдооживляющего газа, м/с;  $\varepsilon$  — порозность неподвижного слоя ПМГ;  $d_{\Gamma}$  — средний диаметр частиц ПМГ;  $\rho_{\Gamma}$  — физическая плотность несущего газа, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения потерь давления несущего газа через подвижный слой псевдооживленного ПМГ необходимо преобразовать уравнение (1), введя понятие относительной скорости газа в поровых каналах:  $V_{\Gamma} = \varepsilon U_{\Gamma}$ , где  $U_{\Gamma}$  — скорость ПМГ относительно стенок трубопровода.

Общие потери давления несущего газа  $\Delta P_{\text{общ}}$  в движущемся слое в режиме ЗПС состоят из двух видов потерь:

$$\frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\Delta l} = \frac{\Delta P_1}{\Delta l} + \frac{\Delta P_2}{\Delta l}. \quad (2)$$

Второе слагаемое в уравнении (2) позволяет учесть потери давления на трение:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta l} = \lambda_{\tau} \frac{U_{\tau}^2}{2D_{\text{тр}}} \rho_{\tau} (1 - \varepsilon), \quad (3)$$

где  $\lambda_{\tau}$  — коэффициент сопротивления движению частиц ПМГ;  $D_{\text{тр}}$  — диаметр трубопровода, м;  $\rho_{\tau}$  — плотность материала транспортируемых частиц ПМГ, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость ПМГ относительно стенок трубопровода можно определить, зная экспериментальные значения массового секундного расхода твердой фазы  $\Delta m / \Delta t$  (кг/с):

$$U_{\tau} = \frac{4\Delta m}{\Delta t \pi D_{\text{тр}}^2 \rho_{\tau} (1 - \varepsilon_{\text{д}})}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{\text{д}} = (0,96 \dots 0,90)\varepsilon$ .

Критериальное уравнение для определения  $\lambda_{\tau}$  имеет вид [3]

$$\lambda_{\tau} = A \left( \frac{D_{\text{тр}}}{d_{\tau}} \right)^b i^c \text{Fr}_{\tau}^e, \quad (5)$$

где  $A = 0,32$ ;  $b = 1,32$ ;  $c, e$  — постоянные коэффициенты,  $c = 0,87$ ,  $e = -0,62$ ;  $i = (V_{\text{г}} / U_{\tau})^{0,87}$  — коэффициент проскальзывания между твердой и газообразной фазами псевдоожигенного ПМГ;  $\text{Fr}_{\tau} = U_{\tau}^2 / g d_{\tau}$  — критерий Фруда;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

На основании вышеизложенного можно записать общее уравнение для расчета потерь давления несущего газа по трубопроводу:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{\Delta l} = & 72\varphi \left[ \mu_{\text{г}} V_{\text{г}} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{d_{\tau}^2 \varepsilon^3} + V_{\text{г}}^2 \rho_{\text{г}} \frac{1 - \varepsilon}{120 d_{\tau} \varepsilon^3} \right] + \\ & + 0,32 \left( \frac{D_{\text{тр}}}{d_{\tau}} \right)^{1,32} \left( \frac{V_{\text{г}}}{U_{\tau}} \right)^{0,87} \text{Fr}_{\tau}^{-0,62} \frac{U_{\tau}^2}{2D_{\text{тр}}} \rho_{\text{г}} (1 - \varepsilon). \end{aligned} \quad (6)$$

Гидродинамический коэффициент слоя  $\varphi$  для каждого ПМГ определяют экспериментально по результатам продувок неподвижного слоя при  $U_{\tau} = 0$ . Эксперименты, проведенные для ПМГ марки ПА-4, дали значения  $\varphi_{\text{ПА-4}} = 13$ , для ПМГ АСД-1 —  $\varphi_{\text{АСД-1}} = 7,5$ .

Заданный массовый расход ПМГ и его распределение в объеме камеры сгорания можно обеспечить с помощью струйных или центробежных форсунок, используемых для подачи обычных ньютоновских жидкостей. В работе распыливающих форсунок на псевдоожигенном ПМГ имеются определенные отличия. Особенности реологических

свойств псевдоожигенных ПМГ, представляющих двухфазную систему с большим содержанием твердых частиц металла, влияют на традиционные характеристики распыла жидкостных форсунок. Для определения коэффициента расхода при распыле ПМГ на специально созданной установке, позволяющей обеспечивать подачу псевдоожигенного ПМГ, проведены исследования работы форсунок различных типов.

Отметим, что характер изменения гидравлических характеристик при течении ПМГ и при течении обычных жидкостей аналогичен. Поэтому для определения расхода ПМГ в первом приближении предлагается использовать уравнение, аналогичное уравнению расхода ньютоновских жидкостей, в котором вместо плотности жидкости используется плотность смеси, определяемая по уравнению

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{т}}(1 - \varepsilon) + \rho_{\text{г}}\varepsilon, \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{т}}$  — плотность твердой фазы.

Уравнение расхода имеет вид

$$m_{\text{ПМГ}} = \mu_{\text{ф}} F_{\text{с}} \sqrt{2\rho_{\text{см}} \Delta P_{\text{ф}}}, \quad (8)$$

где  $m_{\text{ПМГ}}$  — массовый расход ПМГ;  $\mu_{\text{ф}}$  — коэффициент расхода форсунки;  $F_{\text{с}} = \pi d_{\text{с}}^2 / 4$  — площадь сопла форсунки;  $d_{\text{с}}$  — диаметр тормозящего устройства;  $\rho_{\text{см}}$  — плотность псевдоожигенного ПМГ;  $\Delta P_{\text{ф}}$  — перепад давления на форсунке.

Коэффициент расхода форсунки позволяет учесть свойства псевдоожигенного ПМГ и геометрические особенности форсунки. Числовые значения этого коэффициента соответствуют марке подаваемого ПМ и могут быть аппроксимированы зависимостями вида

$$\frac{m_{\text{ПМГ}}}{F_{\text{с}}} = C (\Delta P_{\text{ф}})^n, \quad (9)$$

где  $C$  и  $n$  — некоторые экспериментальные константы (для порошка ПА-4  $C = 5,05$ ;  $n = 0,59$ ; для порошка АСД-1  $C = 5,61$ ;  $n = 0,59$ ).

Коэффициенты расхода  $\mu_{\text{ф}}$ , оцененные по предложенной зависимости, не менее чем вдвое меньше коэффициентов расхода при проливках этих же форсунок на воде, что свидетельствует о больших потерях при течении плотного двухфазного потока. На основании проведенных исследований установлено, что максимальные потери возникают при формировании потока порошка на входе в форсунку.

Малое количество газа и дискретность подаваемого порошка не приводят к увеличению угла раскрытия факела при использовании центробежных форсунок, работающих на ПМГ. Сравнительный анализ экспериментальных данных показывает, что значения коэффици-

ентов расхода струйных форсунок при работе на псевдооживленном ПМГ выше коэффициентов расхода шнекоцентробежных форсунок в среднем на 40...50 %, что делает использование центробежных форсунок нецелесообразным.

Задачей расчета системы подачи ПМГ является определение потребных запасов газа, давлений в расходных емкостях ПМГ, расходов несущего газа, размеров форсунок при следующих известных характеристиках: тип и свойства подаваемого ПМГ; массовый расход ПМГ через форсунку ( $m_{\text{ПМГ}}$ ); свойства несущего газа; давление в камере сгорания ( $P_{\text{к.с}}$ ); заданный перепад давления на форсунке ( $\Delta P_{\text{ф}}$ ).

Используя уравнение (9), рассчитываем потребную площадь сопла струйной форсунки и его диаметр.

Зная потребное давление в камере сгорания и перепад давления на форсунке, определяем давление перед тормозящим насадком (форсункой).

Принимая во внимание, что режим ЗПС реализуется при определенных для каждого ПМГ соотношениях диаметра трубопровода и диаметра сопла форсунки (например, для ПА-4  $D_{\text{тр}} = 4,17d_{\text{с}}$ , для АСД-1  $D_{\text{тр}} = 5,88d_{\text{с}}$ ), определяем потребный диаметр трубопровода. Для совокупности форсунок в качестве  $d_{\text{с}}$  используется эквивалентный диаметр  $d_{\text{с.э}}$ , определяемый через суммарную площадь всей совокупности распыливающих элементов.

По уравнению (4) определяем скорость движения ПМГ по трубопроводу, используя значения динамической порозности [3].

Скорость несущего газа определяем по выражению

$$V_{\text{г}} = U_{\text{т}} \left[ 2,53(k_1 k_2)^{0,5} \left( \frac{d_{\text{с}}}{D_{\text{тр}}} \right)^{0,61} \left( \frac{d_{\text{с}}}{d_{\text{т}}} \right)^{0,6} \left( \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{т}}} \right)^{0,46} \right]^{-1}, \quad (10)$$

принимая во внимание, что плотность газа изменяется по длине трубопровода.

Величина  $k_1$  позволяет учесть влияние внутреннего трения газа при движении его в поровых каналах и рассчитывается по формуле

$$k_1 = \frac{2,72}{\varphi^{0,67}}.$$

Величина  $k_2$  позволяет учесть влияние угла входа в тормозящий насадок. При углах входа больше или равных  $90^\circ$  значение  $k_2$  принимают равным единице, для углов входа меньше  $90^\circ$   $k_2 = 1,0 \dots 2,2$ .

Используя уравнение (6), определяем потери давления несущего газа на участках трубопровода и суммарные потери давления на всей длине подводящей магистрали:

$$\Delta P_{\text{общ}} = L_{\text{тр}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{\Delta l}, \quad (11)$$

где  $n$  — число участков;  $L_{\text{тр}}$  — общая длина трубопровода.

Методика апробирована для трубопроводов длиной не более 3 м.

Определяем потребное давление газа в расходной емкости, суммируя значения давления перед форсункой и общие потери давления по трубопроводу.

Используя уравнения (10) и (11), получаем

$$P_6 = P_{\text{к.с}} + \Delta P_{\text{ф}} + \Delta P_{\text{общ.}} \quad (12)$$

Расход транспортирующего газа определяем по выражению

$$m_{\text{г}} = m_{\text{ПМГ}} 0,239 \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \frac{\varphi^{0,33}}{k_2^{0,5}} \left( \frac{d_{\text{с}}}{D_{\text{тр}}} \right)^{-0,61} \left( \frac{d_{\text{с}}}{d_{\text{т}}} \right)^{-0,60} \left( \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{т}}} \right)^{0,54} + m_{\text{ПМГ}} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{т}}}. \quad (13)$$

Зная общее время работы, определяем потребный запас газа

$$M_{\text{г}} = k m_{\text{г}} \tau, \quad (14)$$

где  $M_{\text{г}}$  — потребный запас газа;  $\tau$  — общее время работы;  $k$  — коэффициент запаса.

Проведенные исследования позволили установить влияние различных факторов (диаметр частиц металла, соотношение диаметров трубопровода и тормозящего насадка, тип ПМ, давление в камере сгорания) на параметры подачи ПМ.

Показано, что минимальное значение массового расхода несущего газа для псевдооживления ПМ составляет не более 5 % массового расхода порошка. Для стабилизации режима течения ПМ необходимо выдерживать в расходной емкости постоянную порозность, вытесняя ПМ из расходной емкости, например с помощью перемещающегося поршня.

Установлено, что при расчете расхода ПМ допустимо использование значений коэффициента расхода распылителей, рекомендованных для расчета подачи ньютоновских жидкостей, уменьшенных в 2–3 раза в зависимости от размеров частиц и типа ПМГ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Власов Ю.Н., Шацкий О.Е. Методика проведения исследований по подаче ПМГ в газогенератор в режиме ЗПС. *Вопросы двигателестроения*, 1998, № 510, с. 23–29.

- [2] Кунии Д., Левеншпиль О. *Промышленное псевдоожигение*. Москва, Химия, 2006, 440 с.
- [3] Разинов Ю.Н., Степочкин Б.Ф. Пневмотранспорт зернистых материалов заторможенным плотным слоем. *Химия и технология топлив и масел*, 1976, № 1, с. 35–38.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Власов Ю.Н., Шацкий О.Е. Особенности расчета системы подачи псевдоожигенного металлического горючего в режиме заторможенного плотного слоя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/708.html>

**Власов Юрий Николаевич** родился в 1937 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: unvlasov@yandex.ru

**Шацкий Олег Евгеньевич** родился в 1941 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г.; канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: zaytseva@power bmstu.ru