

УДК 662.613  
DOI: 63430/TIA202503013

## **Принципы моделирования процесса шлакообразования в энергетических установках\***

**В.А. Бабук<sup>1</sup>, Д.И. Куклин<sup>1</sup>, С.Ю. Нарыжный<sup>1</sup>, В.А. Сорокин<sup>2</sup>,  
Л.С. Яновский<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*АО «Машиностроительное конструкторское бюро «Искра»,  
Москва*

<sup>3</sup>*Федеральный исследовательский центр химической физики  
и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская область*

E-mail: dimityukulin1997@mail.ru

Установлены принципы моделирования процесса шлакообразования в камере сгорания энергосиловых установок при использовании высоконапорных материалов — твердых и пастообразных топлив, который определяется процессами горения топлива, эволюции многофазного потока в камере сгорания и поведения шлаковых остатков на элементах конструкции. Показана последовательность использования характеристик этих процессов для описания шлакообразования. Приведена разработанная авторами модель эволюции многофазного потока. Эта модель является ключевым инструментом для описания процесса шлакообразования. Ее особенностями являются детальное описание превращений частиц крупной фракции конденсированных продуктов и учет взаимодействия конденсированной и газовой фаз потока. Модель базируется на использовании комбинированного подхода Эйлера — Лагранжа (Euler — Lagrange). Для валидации модели проведено экспериментальное исследование с использованием модельного двигателя на базе алюминизированного пастообразного топлива. Результаты исследования позволили сделать вывод об адекватности модели. Определены направления дальнейших работ для решения задачи моделирования рассматриваемого процесса при варьировании параметров состава и условий в камере сгорания.

**Ключевые слова:** агломерат, конденсированные продукты, эволюция, шлаковые остатки, валидация.

### **Введение**

Непременным компонентом высоконапорных материалов (ВЭМ) — твердых и пастообразных топлив — является металлическое горючее. Введение этого компонента

---

\* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00071.

обусловлено необходимостью повышения энергетического потенциала ВЭМ. Как правило, в качестве подобного компонента используются такие вещества как Al, Mg, В. Важным следствием использования этих веществ является образование конденсированных продуктов горения. Наличие данных продуктов приводит к целому ряду проблем при эксплуатации энергосиловых установок (ЭСУ): к потере удельного импульса тяги, шлакообразованию, дополнительному термохимическому воздействию на элементы конструкции и т.д.

Рассмотрим проблему шлакообразования. Она является следствием инерционности частиц крупной фракции конденсированных продуктов, которые не отслеживают линии тока газа и имеют возможность попадать на элементы конструкции, формируя шлаковые остатки. Негативные последствия шлакообразования главным образом сводятся к увеличению пассивной массы летательного аппарата, а, следовательно, и к снижению его эффективности. Это является значимым фактором как для твердотопливных, так и комбинированных двигателей [1–3]. Кроме того, при увеличении массы шлакового остатка возникает проблема роста потерь удельного импульса тяги.

Моделирование процесса шлакообразования предполагает решение трех задач:

- определение характеристик конденсированных продуктов у поверхности горящего топлива;
- описание превращений конденсированных продуктов в составе потока продуктов сгорания и определение потока осаждающихся продуктов;
- описание превращений конденсированных продуктов после реализации осаждения.

Ключевое значение имеет решение второй задачи, которому посвящено значительное количество работ [1, 2, 4–7]. В этих работах с той или иной степенью детализации описывалось движение газовой и конденсированной фаз и их взаимодействие. Для всех работ характерна высокая степень схематизации превращений частиц (горение металла агломератов), в работе [7] это явление вообще не учитывалось.

В более ранних работах [1, 2 и др.] не учитывалось взаимное влияние конденсированной и газовой фаз потока, обусловленное сгоранием металла агломератов. В последующем эта проблема была решена. Проанализируем более подробно одну из последних работ — работу [4]. Она базировалась на использовании обобщенного подхода Эйлера–Лагранжа. Учет влияния превращений частиц конденсированной фазы на движение газовой фазы обеспечивалось за счет введения в уравнения механики сплошной среды источниковых членов. Начальные условия для частиц задавались с использованием экспериментальных данных по исследованию процесса агломерации. Была выполнена валидация разработанной модели. Конечным результатом работы явились создание методики прогнозирования шлаковых остатков. Однако ряд положений работы вызывают неудовлетворенность. Во-первых, к такому положению относится несоответствие описания агломератов существующим представлениям о процессе агломерации. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют, что в процессе агломерации участвует не все исходное металлическое горючее. Его часть сгорает вблизи поверхности горящего топлива, формируя высокодисперсный оксид (ВДОК) — частицы размером  $\sim 1$  мкм и менее. Агломераты, поставляемые в газовую fazу, имеют в своем составе оксид — сар oxide. В то время как в работе считается, что весь металл агломерирует и образующиеся агломераты состоят только из металла. Во-вторых, описание горения металла агломератов базировалось на эмпирических зависимостях, которые не в полной мере отражают физическую природу рассматриваемого процесса. Считалось, что скорость горения металла зависит от размера частиц, концентрации окисляющих газов и температуры

окружающей среды. В то же время в исследовании [8] было показано, что скорость горения в существенной мере зависит и от условий обдува агломерата, а также от его структуры. В-третьих, валидацию модели нельзя признать успешной, можно говорить только о качественном соответствии результатов расчета и экспериментов.

Таким образом, по-прежнему существует необходимость совершенствования средств для описания превращений конденсированных продуктов в газовой фазе и определения потока осаждающихся продуктов. Настоящая работа посвящена разработке общей концепции решения задачи моделирования шлакообразования, а также средств для моделирования многофазного потока продуктов сгорания.

## **1. Общая физическая картина явлений, обеспечивающих процесс шлакообразования**

Процесс шлакообразования связан с явлениями, имеющими место в камере сгорания по отношению к крупной фракции конденсированных продуктов. Рассмотрим их подробнее.

### **1.1. Процесс агломерации**

Агломерация является одним из проявлений процесса горения топлива. Она представляет собой процесс укрупнения конденсированных продуктов в поверхностном слое горящего топлива. Продукты укрупнения — агломераты — поставляются в газовую фазу, формируя крупную фракцию конденсированных продуктов.

К настоящему времени практически значимую информацию об этом процессе получают посредством проведения экспериментальных работ. Разработана совокупность методик экспериментального исследования [9–11 и др.] и получены данные, позволяющие оценивать влияние различных факторов на процесс агломерации. Применительно к алюминизированным ВЭМ (наиболее распространенному типу данных материалов) осуществлена разработка ряда математических моделей, обеспечивающих описание различных проявлений этого процесса. Анализ таких моделей приводится, например, в работах [12–14].

Можно констатировать, что информация об агломератах (данные о количестве, дисперсности, химическом составе и структуре) имеет принципиальное значение для описания поведения крупной фракции конденсированных продуктов в камере сгорания ЭСУ.

### **1.2. Эволюция многофазного потока**

Частицы крупной фракции конденсированных продуктов при движении в газовой фазе претерпевают совокупность физико-химических превращений, которые можно рассматривать как часть общего процесса эволюции многофазного потока. Этот поток включает несущую газовую fazу и частицы конденсированной фазы, имеющие различный химический состав, т.е. по существу являющиеся многофазными системами.

Применительно к алюминизированным ВЭМ можно выделить следующие явления, составляющие эволюцию конденсированных продуктов [4]:

- движение частиц конденсированных продуктов в потоке газа;
- газофазное горение Al-агломератов с образованием ВДОК — мелкой фракции конденсированных продуктов сгорания;
- трансформацию частиц ВДОК за счет коагуляции (броуновской, турбулентной и т.д.) и конденсации на их поверхности продуктов горения металла агломератов;

— химическое взаимодействие между Al и  $Al_2O_3$  в составе агломератов с формированием газообразных продуктов и возможным выносом продуктов реакции в окружающую среду;

— изменение структуры агломератов;

— осаждение частиц ВДОК несущей газовой фазы на поверхности агломератов с последующим взаимодействием с веществами в составе этих агломератов.

Также следует отметить, что при движении на входе в предсопловой объем потенциально возможно явление гидродинамического дробления частиц крупной фракции.

Реализация процесса эволюции приводит к изменению характеристик как конденсированных продуктов (параметров дисперсности, химического состава, структуры, температуры), так и газовой фазы (параметров состава, температуры).

К настоящему времени выполнен ряд работ по моделированию эволюции многофазного потока продуктов сгорания ВЭМ [15–20]. Неудовлетворенность этими работами связана с недостаточной проработанностью описания превращений конденсированных продуктов и межфазного взаимодействия. Кроме того, остается открытым вопрос о валидации разработанных моделей.

### **1.3. Формирование шлакового остатка**

Осаждение частиц конденсированных продуктов становится возможным, когда траектории этих частиц пересекают поверхность конструктивных элементов двигательной установки. В общем случае описание процесса эволюции многофазного потока обеспечивает определение потока осаждающихся продуктов. Однако масса шлаковых остатков зависит не только от интенсивности осаждения. В общем случае, она зависит от следующих явлений:

— от выноса конденсированных продуктов из камеры сгорания (если шлаковые остатки находятся в жидком состоянии, то образующаяся жидккая пленка способна к движению под воздействием потока продуктов сгорания [20]);

— от изменения характеристик шлакового остатка при взаимодействии с материалами камеры сгорания.

Можно констатировать, что в настоящее время адекватное описание этих явлений отсутствует.

В целом можно определить совокупность факторов, влияющих на процесс шлакообразования (рис. 1). К ним относятся рецептурные решения, связанные с характеристиками состава ВЭМ, определяющие закономерности процесса горения, которые, в свою очередь, обуславливают особенности реализации агломерационного процесса и закон скорости горения. На этот процесс оказывают влияние и условия горения (давление и величина перегрузки). Параметры агломератов, скорость горения и условия в камере сгорания определяют особенности осуществления эволюционного процесса многофазного потока продуктов сгорания, а, следовательно, и свойства крупной фракции конденсированных продуктов, которые, в свою очередь, являются главным фактором по отношению к интенсивности осаждения этих продуктов на элементы конструкции. Интенсивность осаждения оказывает определяющее влияние на процесс шлакообразования.

## **2. Моделирование процесса эволюции многофазного потока**

Ключевую роль при моделировании шлакообразования играет модель эволюции многофазного потока. Рассмотрим модель, разработанную авторами настоящей работы.

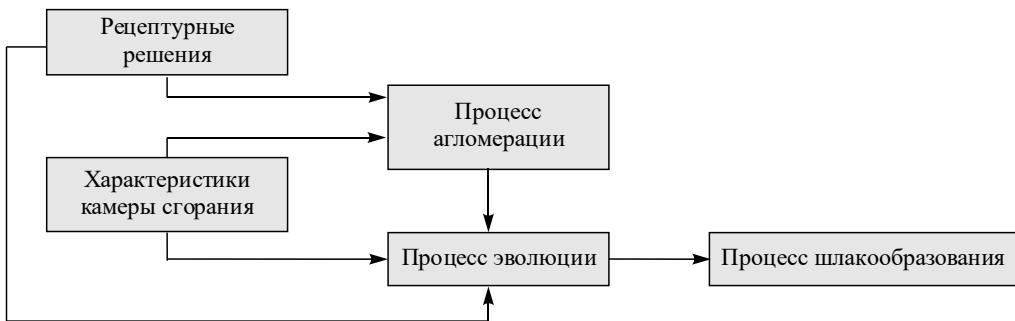


Рис. 1. Схема влияния различных факторов на процесс шлакообразования.

В основе моделирования лежит использование комбинированного подхода Эйлера – Лагранжа применительно к многофазному потоку продуктов сгорания, содержащему смесь химически активных газообразных продуктов, эволюционирующие агломераты и частицы мелкой фракции конденсированных продуктов сгорания. Подход Эйлера используется для описания движения совокупности газообразных продуктов и частиц мелкой фракции, а подход Лагранжа — для описания движения агломератов. Очевидно, что свойства всех компонентов многофазного потока оказывают взаимное влияние. Схематично принятый подход к описанию эволюции потока продуктов сгорания применительно к алюминизированным ВЭМ представлен на рис. 2.

Эволюция агломератов оказывает определяющее влияние на изменение химического состава и температуры газовой фазы. Учет этого влияния осуществляется посредством введения в уравнения механики сплошной среды источниковых членов. В свою очередь, для определения этих членов вводится понятие «расчетная ячейка». Данные ячейки представляют собой часть трубы тока газообразных продуктов сгорания, опирающиеся на участки поверхности топлива  $\Omega_m$  (рис. 3). Агломераты вследствие реализации процесса эволюции, попадая в соответствующую ячейку, приводят к изменению количества движения, вещества, энергии и химического состава газовой фазы. Информация об этих изменениях является исходной для определения источниковых членов в данной пространственной области (расчетной ячейке). Таким образом, введение подобных ячеек является инструментом для описания межфазного взаимодействия.

Далее изложим принятые решения, связанные с характеристиками конденсированной и газовой фаз.

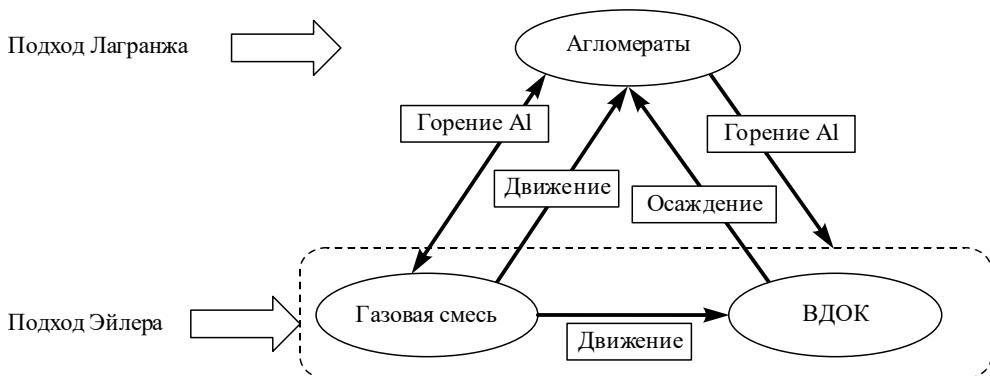


Рис. 2. Схема использования комбинированного подхода Эйлера – Лагранжа.

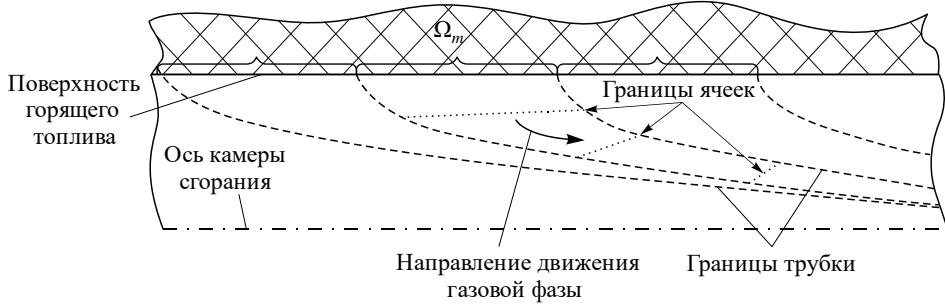


Рис. 3. Схема расчетной области.

## 2.1. Свойства и течение газообразных продуктов

Сравнительно малая скорость сгорания металла агломератов является основанием для использования методов равновесной термодинамики для определения состава и температуры газообразных продуктов в пределах расчетной ячейки. Наличие информации о составе и температуре газообразных продуктов горения, в свою очередь, позволяет определить изобарную теплоемкость, а также параметры молекулярного переноса.

Значительные размеры камеры сгорания и гетерогенная структура топлива дают основание считать, что режим течения является турбулентным. Моделирование течения смеси газообразных продуктов осуществляется путем численного решения системы осредненных по Рейнольдсу уравнений движения, энергии, неразрывности и материального баланса. Для условий в камере сгорания вводятся следующие допущения: поток является несжимаемым, стационарным, кинетическая энергия пренебрежимо мала по сравнению с внутренней энергией. Отметим, что в рамках решаемой задачи не рассматриваются области, связанные с высокой скоростью газового потока (число Маха не превышает 0,2), что позволяет считать газ несжимаемым. Размеры расчетной области, определяемые внутренним объемом камеры сгорания, обуславливают сравнительно малые скорости движения газовой фазы, что является основанием не учитывать кинетическую энергию направленного движения.

Уравнения движения в проекциях на  $i$ -е координаты имеют вид:

$$(\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) u_i + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \nabla (\mu_e \nabla u_i) - \rho F_i = S_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

уравнение неразрывности записывается как

$$\rho (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \sum_j S_j, \quad (2)$$

уравнение энергии —

$$(\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) h - \nabla (\lambda_e \nabla T) - \rho \sum_{j=1}^N h_j \nabla (D_{e,j} \nabla Y_j) = S_h, \quad (3)$$

уравнения материального баланса —

$$(\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) Y_j - \rho \nabla (D_{e,j} \nabla Y_j) = S_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{u}$  — вектор скорости газа, м/с;  $u_i$  — проекция вектора скорости на  $i$ -ю ось, м/с;  $x_i$  — координаты, м;  $P$  — давление, Па;  $\mu_e$  — эффективная динамическая вязкость, Н·с/м<sup>2</sup>;  $F_i$  — проекция массовой силы, Н;  $n$  — число осей координат ( $n = 2$  если задача плоская или осесимметрична,  $n = 3$  — задача объемная);  $\lambda_e$  — эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T$  — температура, К;  $h(T)$  — удельная энталпия смеси продуктов горения, Дж/кг;  $h_j(T)$  — удельная энталпия  $j$ -го компонента, Дж/кг;  $Y_j$  — массовая доля  $j$ -го компонента;  $D_{ej}$  — эффективный коэффициент диффузии  $j$ -го компонента, м<sup>2</sup>/с;  $S_i$  — источник количества движения, кг/(с<sup>2</sup>·м<sup>2</sup>);  $S_j$  — источник массы, кг/(с·м<sup>3</sup>);  $S_h$  — источник энергии, Дж/(с·м<sup>3</sup>);  $N$  — количество в смеси газообразных продуктов;  $k$  — кинетическая энергия турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Эффективные параметры переноса ( $\mu_e$ ,  $\lambda_e$ ,  $D_{ej}$ ) учитывают влияние явлений турбулентного переноса. Они определяются следующим образом:

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \quad \lambda_e = \lambda + \frac{\mu C_p}{Pr_t}, \quad D_{ej} = D_{mj} + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t},$$

где  $\mu_t$  — турбулентная вязкость, Па·с;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $C_p$  — удельная теплоемкость смеси при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $D_{mj}$  — коэффициент молекулярной диффузии  $j$ -го компонента, м<sup>2</sup>/с;  $Pr_t$ ,  $Sc_t$  — соответственно турбулентные числа Прандтля и Шмидта, которым присваиваются значения 0,9.

В качестве модели турбулентности используется  $k-\varepsilon$ -модель турбулентности, замыкающая систему (1)–(4) двумя дополнительными уравнениями переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  [21]:

$$(\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$(\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon), \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $P_k$  — скорость генерации кинетической энергии турбулентности, обусловленная наличием градиентов средней скорости, кг/(м·с<sup>3</sup>).

Турбулентная вязкость  $\mu_t$  вычисляется по формуле Колмогорова–Прандтля:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}.$$

Постоянным параметрам модели присваиваются следующие значения:  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ . Пристеночная область при обтекании поверхностей разрешается с использованием пристеночных функций [21], связывающих параметры турбулентного течения с расстоянием от стенки.

Расчетная область ограничена поверхностями горящего топлива и стенками двигателя, а также выходным сечением, которое является поверхностью входа в предсопловой объем. Границные условия задаются исходя из следующих условий:

- непроницаемость стенки камеры и «прилипания» на ней потока;

- знание скорости горения топлива и характеристик продуктов сгорания на поверхности топлива;
- непревышение числом Маха величины 0,2 на входе в предсопловой объем;
- характеристики турбулентности на стенке определяются пристеночными функциями, на поверхности топлива — интенсивностью турбулентности (эта величина принимается равной 0,2).

Ниже приводятся эти условия при осесимметричной постановке.

На поверхности топлива имеем:

$$\mathbf{u}_n \rho = -\mathbf{u}_t \rho_t, \quad u_z = u_{nz}, \quad u_r = u_{nr}, \quad T = f_1(X_m^0), \quad Y_j = f_2(X_m^0),$$

здесь величина  $\rho$  определяется при использовании уравнения состояния идеального газа. Функции  $T = f_1(X_m^0)$  и  $Y_j = f_2(X_m^0)$  отыскиваются при помощи аппарата равновесной термодинамики с использованием значения  $X_m^0$ .

У стенки имеем:

$$u_z = 0, \quad u_r = 0, \quad \nabla T = 0, \quad \nabla Y_j = 0,$$

в выходном сечении:

$$P_{\text{out}} = P(0, 2M);$$

на оси симметрии:

$$u_r = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial Y_j}{\partial r} = 0.$$

Здесь  $\mathbf{u}_n$  — вектор скорости газа, нормальный к поверхности горения, м/с;  $u_z$ ,  $u_r$  — соответственно продольная и радиальная составляющие вектора скорости, м/с;  $u_{nz}$ ,  $u_{nr}$  — проекции  $\mathbf{u}_n$  на продольную и радиальную координаты, м/с;  $\mathbf{u}_t$  — скорость горения топлива, м/с;  $\rho_t$  — плотность топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $X_m^0$  — доля сгоревшего металла у поверхности топлива;  $M$  — число Маха;  $r$  — радиальная координата, м;  $P_{\text{out}}$  — давление в выходном сечении, Па.

Система уравнений (1)–(4) с учетом (5), (6) решается численно с использованием пакета прикладных программ Ansys Fluent 2023 R2, реализующего метод конечных объемов.

Таким образом, описание газовой фазы базируется на подходе Эйлера.

## 2.2. Эволюция конденсированных продуктов

Решение задачи моделирования эволюции агломератов сводится к расчету траекторий в известном поле параметров газовой фазы и определению изменений характеристик агломератов вдоль траекторий. Для этого применительно к каждой фракции агломератов проводится интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей движение и изменение состава агломератов:

$$\frac{d^2 x_{ai}}{dt^2} = \frac{3}{4} \frac{C_D \rho}{D_a \rho_a} \Delta u_a (u_i - u_{ai}) + F_{iud}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

$$\frac{dm_l}{dt} = J_l, \quad l = 1, \dots, 3. \quad (8)$$

где  $x_{ai}$  — проекции координат агломерата на  $i$ -ю ось, м;  $t$  — время, с;  $C_D$  — коэффициент лобового сопротивления;  $u_{ai}$  — проекции вектора скорости агломерата на  $i$ -ю ось, м;  $D_a$  — диаметр агломерата, м;  $\rho_a$  — плотность агломерата, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta u_a$  — абсолютная разность скорости агломерата и газа, м/с;  $m_l$  — масса  $l$ -го компонента в составе агломерата, кг;  $J_l$  — массовый поток  $l$ -го компонента, возникающего вследствие явлений при эволюции, кг/с;  $F_{iud}$  — проекция удельной массовой силы, м/с<sup>2</sup>.

Величины мольных потоков  $J_l$  зависят как от параметров частиц конденсированной фазы (размера и морфологии частиц), так и от свойств газа: величины окислительного потенциала, температуры, скорости потока и т.д. [22].

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{ai} &= x_{iin}, \\ \frac{dx_{ai}}{dt} &= 0, \\ m_l &= m_l^{in}, \end{aligned}$$

где  $x_{iin}$  — координаты центра участка поверхности  $\Omega_m$ , м;  $m_l^{in}$  — масса  $l$ -го вещества в составе агломератов, поставляемых с поверхности топлива. Коэффициент лобового сопротивления вычисляется следующим образом [23]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left( 1 + 0,179\sqrt{Re} + 0,013Re \right),$$

где  $Re$  — число Рейнольдса.

### 2.3. Межфазное взаимодействие

Взаимное влияние фаз связано с взаимодействием крупной фракции конденсированных продуктов — агломератов и газовой фазы. Влияние эволюции агломератов на свойства газовой среды моделируется введением источниковых членов в уравнения (1)–(4). Для расчета параметров поля источниковых членов выполняются следующие действия.

1. Расчетная область представляется как совокупность расчетных ячеек (см. рис. 3). Выбор характерных размеров этих ячеек обусловлен следующими соображениями: уменьшение указанных размеров приводит, с одной стороны, к увеличению точности расчета, а с другой — к росту времени счета.

2. После интегрирования системы уравнений, описывающих эволюцию агломератов, проводится геометрический анализ траекторий агломератов и устанавливаются изменения их характеристик при нахождении в пределах ячеек.

3. По изменениям массового потока и химического состава агломератов в пределах каждой расчетной ячейки выявляется количество веществ, поступивших в газовую fazу вследствие эволюции агломератов, а также изменение энтальпии газовой фазы в ячейке. Использование аппарата равновесной термодинамики обеспечивает определение изменения химического состава смеси в ячейке. Это учитывается далее при расчете источниковых членов.

4. Источниковые члены в каждой ячейке находятся следующим образом:

$$S_i = \frac{\bar{u}_{ai} \left( M_g - M_g^0 \right)}{V}, \quad S_j = \frac{M_g Y_j - M_g^0 Y_j^0}{V}, \quad S_h = \frac{M_g h - M_g^0 h^0}{V}, \quad (9)$$



Рис. 4. Схема численного моделирования.

$V$  — объем ячейки, м<sup>3</sup>;  $\bar{u}_{a_i}$  — проекция осредненного вектора скорости всех агломератов в ячейке на  $i$ -ю ось координат, м/с;  $M_g$  — массовый поток газообразных продуктов сгорания через расчетную ячейку; индексом 0 здесь обозначены исходные значения параметров в ячейке.

5. Поле источниковых членов определяется посредством интерполяции значений, полученных в каждой расчетной ячейке, после чего вычисляются значения источниковых членов в ячейках сетки газодинамического расчета.

#### 2.4. Характеристики потока

Расчет параметров смеси газообразных продуктов и крупной фракции конденсированных продуктов — агломератов — осуществляется путем реализации глобальных итераций. На каждом шаге этого процесса решаются системы уравнений (1)–(4) с учетом (5), (6) при имеющихся данных об источниковых членах. Затем определяются характеристики агломератов, которые являются следствием процесса их эволюции, и новые значения источниковых членов. Эти значения используются для повторения расчета. Итерации осуществляются до достижения заданного уровня сходимости параметров газовой фазы в контрольных точках, расположенных в расчетной области. На рис. 4 приведена схема, иллюстрирующая проведение расчета.

Моделирование многофазного потока обеспечивает определение характеристик всех конденсированных продуктов, включая агломераты, попадающие на поверхность камеры сгорания, т.е. обеспечивающие реализацию процесса шлакообразования. Считается, что агломераты, траектории которых пересекают физические границы камеры сгорания, формируют поток осаждающихся продуктов. Таким образом, появляется возможность определения массового потока агломератов, попадающих на поверхность камеры.

#### 3. Валидация модели

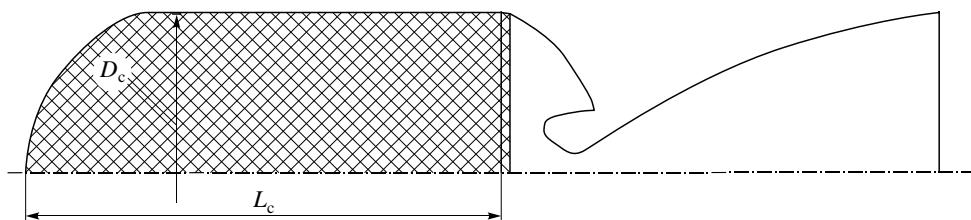


Рис. 5. Принципиальная схема двигателя на пастообразном топливе.

$D_c$  и  $L_c$  — соответственно диаметр и длина заряда.

Проверка адекватности моделирования осуществлялась применительно к двигателям на унитарном пастообразном топливе (ПРТ). Эти двигатели имеют торцевую поверхность горения (принципиальная схема подобного двигателя приведена на рис. 5). Следствием этого обстоятельства является рост значимости проблемы шлакообразования [24].

Авторами было проведено экспериментальное исследование, методика которого заключалась в следующем. Использовался модельный двигатель на пастообразном топливе, лишенный тепловой защиты, следствием чего явилось отсутствие взаимодействия осаждающихся конденсированных продуктов с соответствующим покрытием. Конструкция соплового блока имитировала утопленное сопло, что в существенной мере затрудняло вынос осаждающихся конденсированных продуктов из камеры сгорания. Заряд ПРТ имел следующие геометрические характеристики: диаметр — 28 мм, длина — 55 мм. Диаметр критического сечения был выбран равным 5,1 мм. Указанные геометрические параметры обеспечили значение давления в камере сгорания  $\sim 2,1$  МПа. Экспериментальная установка на базе подобного двигателя приведена на рис. 6.

В качестве топлива был выбран состав Bas\_2 [25], который содержал в массовых долях следующие компоненты: модифицированный перхлорат полиэтиленполиамина, пластифицированный этиленгликолем (ХПЕПА-22) — 21 %; перхлорат аммония (ПХА) — 29,5 %; октоген (HMX) — 28,27 %; Al — 20,73 %; активированный уголь — 0,5 %.

Окислитель имел следующие дисперсионные характеристики: ПХА включал две фракции — менее 50 мкм и 110–180 мкм (соотношение мелкой и крупной фракций составляло 35/65), размер частиц HMX находился в интервале 160–315 мкм. В качестве металлического горючего использовался порошок АСД-4.

Перед проведением эксперимента определялась масса топлива. После работы двигателя осуществлялся сбор шлаковых остатков и устанавливались их массы и параметры химического состава. Количество экспериментов при фиксированных условиях равнялось 5. Доверительная вероятность  $\gamma$  при определении границ доверительных интервалов принималась равной 0,95. На рис. 7 показаны шлаковые остатки на входной поверхности соплового вкладыша после проведения эксперимента.

Для условий модельного двигателя осуществлялся расчет массы шлаковых остатков с использованием разработанной модели эволюции многофазного потока примени-

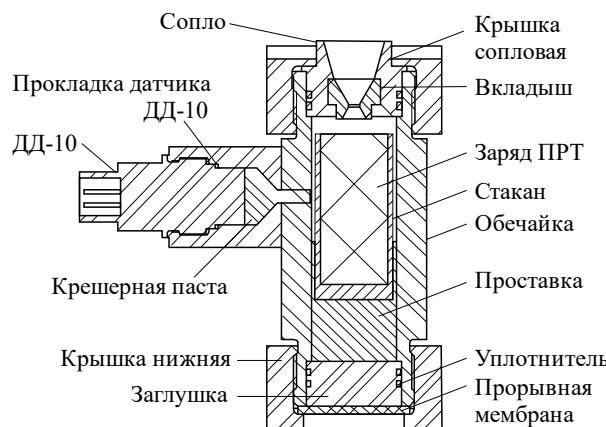


Рис. 6. Схема экспериментальной установки.

ДД-10 — датчик давления, ПРТ — пастообразное топливо.



Рис. 7. Шлаковый остаток.

тельно к алюминизированным ВЭМ. Потоки веществ при эволюции агломератов (уравнение (8)) определялись с помощью модели, описанной в работе [22]. Полидисперсная взвесь агломератов заменялась на совокупность монодисперсных фракций. Количество фракций принималось равным шести. Средние размеры в пределах фракций составляли 50, 75, 100, 125, 150 и 175 мкм.

Газовая фаза включала в себя следующие вещества:  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $OH$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $N_2O$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $HCN$ ,  $CH_2O$ ,  $HNO_3$ ,  $NH_3$ ,  $HCl$ ,  $Cl_2$ ,  $AlO$ ,  $Al_2O$ ,  $AlCl$ ,  $AlCl_2$ ,  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$ ,  $Cl$ .

При проведении расчета учитывалось изменение расчетной области вследствие перемещения поверхности горения. Исходными данными для расчета являлись характеристики процесса горения — закон скорости горения и параметры процесса агломерации:

- $Z_m^a$  — массовая доля исходного металла топлива, участвующего в формировании агломератов;
- $\eta$  — массовая доля оксида в составе агломератов;
- $f_m(D)$  — массовая функция плотности распределения агломератов по размерам;
- $D_{43}$  — среднемассовый размер агломератов, мкм.

Указанные характеристики определялись экспериментально в соответствии с методикой, описанной в работе [26]. Количественные данные этих характеристик, в том числе и для используемого состава, приведены в работе [25]. При выполнении расчетов осуществлялся контроль числа Вебера. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии гидродинамического дробления агломератов в расчетной области. Итоговые результаты экспериментов и расчетов представлены в таблице.

Полученные результаты дают основание для вывода о близости расчетных и экспериментальных данных. Некоторое отличие в содержании оксида в шлаковых остатках, по-видимому, связано с элементами догорания металла агломератов после осаждения.

Таким образом, подтверждена адекватность моделирования процесса эволюции многофазного потока — важнейшего явления, определяющего процесс шлакообразования.

#### 4. Направления дальнейших исследований

В общем случае проблема моделирования шлакообразования, и в частности эволюции многофазного потока, является многогранной. При использовании помимо алюминия других металлических горючих возникает задача адекватного описания эволюции

Таблица

Результаты экспериментов и моделирования

Параметры	Результаты экспериментов ( $\gamma = 0,95$ )	Результаты моделирования
Масса шлака, г	$2,51 \pm 0,14$	2,53
Доля исходного металла в шлаке	$0,146 \pm 0,01$	0,154
Доля оксида в шлаке	$0,48 \pm 0,06$	0,4

агломератов этих металлов. Это требует дополнительных экспериментальных исследований и обобщения их результатов. Имеющаяся в настоящее время информация представляется недостаточной [27]. Кроме того, необходимо проведение дальнейших исследований процесса агломерации для определения характера влияния рецептурных факторов и условий горения на характеристики этого процесса. Также представляется важным исследование влияния различных подходов к моделированию турбулентного режима течения на процесс шлакообразования. Помимо этого, необходимо создание адекватного описания явлений, имеющих место после осаждения конденсированных продуктов на элементы конструкции.

Таким образом, методика прогнозирования шлакообразования должна включать модели агломерации, эволюции многофазного потока и превращений конденсированных продуктов на элементах конструкций.

### **Заключение**

Результаты работы позволили установить принципы моделирования процесса шлакообразования. Их можно сформулировать следующим образом.

Первоначально определяются характеристики процесса горения применительно к используемому топливу: закон скорости горения и параметры процесса агломерации. В настоящее время они должны устанавливаться экспериментально. Следует подчеркнуть, что характеристики процесса агломерации должны включать не только параметры дисперсности, но и параметры, определяющие количество, химический состав и структуру агломератов.

Далее должна использоваться модель эволюции многофазного потока в камере сгорания энергосиловой установки. Ключевыми элементами для нее являются модели эволюции агломератов и взаимодействия конденсированной и газовых фаз. Можно полагать, что применительно к алюминизированным топливам адекватность разработанной модели эволюции многофазного потока подтверждена. Ее использование дает возможность получения практически значимых результатов. Создание подобной модели можно рассматривать как основной результат работы. Также авторами определены направления дальнейших работ по моделированию процесса шлакообразования применительно к различным топливным композициям и двигателенным установкам.

### **Список литературы**

1. Salita M. Deficiencies and requirements in modeling of slag generation in solid rocket motors // J. Propul. Power. 1995. Vol. 11, No. 1. P. 10–23.
2. Boraas S. Modeling slag deposition in the space shuttle solid rocket motor // J. Spacecraft Rockets. 1984. Vol. 21, No. 1. P. 47–54.
3. Сорокин В.А., Яновский Л. С., Козлов В.А., Суриков Е.В., Шаров М.С., Фельдман В.Д., Францкевич В.П., Животов Н.П., Абашеев В.М., Червяков В.В. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки. М.: Физматлит, 2010. 320 с.
4. Wang J., Wang N., Zou X., Dong W., Wang C., Han L., Shi B. Experimental and numerical study on slag deposition in solid rocket motor. Aerospace Sci. and Technology. 2022. Vol. 122. P. 1–12.
5. Shimada T., Daimon Y., Sekino N. Numerical simulation of flow inside a solid rocket motor by eulerian-hybrid approach with relation to nozzle inlet ablation // Proc. of the 8<sup>th</sup> Intern. Symp. on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, July 2007, Lyon, France, paper ref. ISAF8-00109. P. 1–10.
6. Chaturvedi A.K., Kumar S., Chakraborty D. Slag prediction in submerged rocket nozzle through two-phase CFD simulations // Defence Sci. J. 2015. Vol. 65, No. 2. P. 99–106.
7. Chauvet J.-F., Dumas L., Schmeisser K. Modeling of alumina slag formation in solid rocket motors // 31 st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit July 10–12. 1995. P. 1–9.

8. Babuk V.A., Vasilyev V.A. Model of aluminum agglomerate evolution in combustion products of solid rocket propellant // J. Propulsion and Power. 2002. Vol. 18, No. 4. P. 814–824.
9. Похил П.М., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
10. Гладун В.Д., Фролов Ю.В., Кащоров Л.Я. Природа агломерации при горении металлизированных конденсированных систем. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977. 41 с.
11. Babuk V.A., Vassiliev V.A., Sviridov V.V. Formation of condensed combustion products at the burning surface of solid rocket propellant // Progress in Astronautics and Aeronautics. Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / Ed. by V. Yang, T.B. Brill, W.Z. Ren. Reston, VA: AIAA, 2000. Chapter 2.21. P. 749–776.
12. Beckstead M.W. An overview of aluminum agglomeration modeling // Proc. of 50<sup>th</sup> Annual Israeli Aerospace Sci. Conf. Tel Aviv. 2010. P. 1–28.
13. Бабук В.А., Будный Н.Л., Ивоненко А.Н., Низяев А.А. Моделирование характеристик конденсированных продуктов в камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 3. С. 55–63.
14. Gao H., Wang F., Liu H., Chen Y., Liu J. Research progress and prospects on agglomeration models and simulation methods of aluminum particles in aluminum-based composite propellants // Propellants Explosives Pyrotechnics. 2024. Vol. 49, No. 8. P. 1–24.
15. Бабук В.А., Будный Н.Л., Куклин Д.И., Низяев А.А. Модель эволюции многофазного потока продуктов сгорания в камере двигательной установки и результаты ее численного анализа // Изв. РАРАН. 2020. Вып. 111. С. 53–60.
16. Sabinis J.S. Numerical simulation of distributed combustion in solid rocket motors with metalized propellant // J. Propul. Power. 2003. Vol. 19, No. 1. P. 48–55.
17. Attili A., Favini B., Di Giacinto M. Numerical simulation of multiphase flows in solid rocket motors // AIAA Paper. 2009. No. 2009-5507. P. 1–19.
18. Thakre P., Rawat R., Clayton R. Mechanical erosion of graphite nozzle in solid-propellant rocket motor // J. Propulsion and Power. 2013. Vol. 29, No. 3. P. 593–601.
19. Воронецкий А.В., Смоляга В.И., Арефьев К.Ю., Гусев А.А., Абрамов М.А. Параметрическое исследование взаимодействия частиц конденсированной фазы с высокозонтальным потоком воздуха в прямоточной камере сгорания // Инж. журнал: наука и инновации. 2017. Т. 8, № 68. С. 1–16.
20. Dupays J., Fabignon Y., Villedieu P., Lavergne G., Estivalezes J.L. Some aspects of two-phase flows in solid-propellant rocket motors // Progress in Astronautics and Aeronautics. AIAA Reston. VA. 2000. Vol. 185. P. 859–883.
21. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. М.: Физматлит, 2010. 463 с.
22. Babuk V.A., Nizjaev A.A. Modeling of evolution of the coarse fraction of condensed combustion products on a surface of burning aluminized propellant and within a combustion products flow // Intern. J. Energ Mater Chem. Propuls. 2017. Vol. 16, No. 1. P. 22–38.
23. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течение газа с частицами. М.: Физматлит, 2008. 600 с.
24. Бабук В.А., Куклин Д.И., Куклина К.Н., Нарыжный С.Ю. Проблема шлакообразования в двигателях на пастообразном топливе // Горение и взрыв. 2023. Т. 16, № 2. С. 90–97.
25. Бабук В.А., Куклин Д.И., Нарыжный С.Ю., Низяев А.А. Рецептурные решения и закономерности горения пастообразных конденсированных систем // Горение и взрыв. 2024. Т. 17, № 3. С. 101–110.
26. Бабук В.А., Куклин Д.И., Нарыжный С.Ю., Низяев А.А. Пастообразные топлива и закономерности их горения // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59, № 2. С. 125–132.
27. Ягодников Д.А. Горение и воспламенение порошкообразных металлов. М.: Издательство МГТУ им. Э. Баумана, 2009. 431 с.

*Статья поступила в редакцию 12 февраля 2025 г.,  
принята к публикации 18 апреля 2025 г.*