

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБЛИМАЦИИ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗА В КОНТИНУАЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ И С ВЫДЕЛЕНИЕМ ГРАНИЦЫ ДВУХ СРЕД

И. А. Бедарев<sup>1,2,a</sup>, В. М. Темербеков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

<sup>a</sup>bedarev@itam.nsc.ru

Предложено два подхода для численного моделирования двухфазных течений в пористой среде с учётом газификации твёрдой фазы. В первом случае математическая модель пористой среды представляется в двухфазной постановке с использованием модели взаимопроникающих континуумов. Для учёта сублимации горючего использована аррениусовская кинетика. Во втором случае пористая среда задавалась в явном виде с выделением границы двух сред, а для моделирования сублимации твёрдого вещества был использован подход, основанный на модели плавления и кристаллизации. Для обоих подходов созданы вычислительные технологии для моделирования сублимации твёрдого горючего в потоке высокотемпературного окислителя. Проведены параметрические расчёты динамики течения в пористой среде при сублимации твёрдой фазы. Показано, что континуальная равновесная математическая модель, в которой предполагается равенство температур газообразной и твёрдой фазы, позволяет качественно правильно описать динамику процесса газификации твёрдого горючего в потоке высокотемпературного окислителя. Выявлено сходство характерных времён процесса сублимации, рассчитанных с использованием двух подходов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, нестационарный процесс, газогенератор, твёрдое горючее, газификация, сублимация.

## Введение

Одним из перспективных направлений по созданию высокоскоростных летательных аппаратов в настоящее время является использование для создания тяги силовых установок, работающих на твёрдом топливе [1; 2]. Использование твёрдого топлива по сравнению с жидким топливом предпочтительнее по нескольким причинам: простота конструкции двигателя, длительный срок хранения топлива, удобство транспортировки топлива, высокая удельная энергия. При этом рассматриваются схемы с использованием испаряемого твёрдого топлива для охлаждения

---

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-79-20008, <https://rscf.ru/project/21-79-20008/>. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М. В. Ломоносова.

материалов конструкции летательного аппарата конвективным потоком продуктов газификации. Процесс газификации (сублимации) твёрдого горючего происходит при фильтрации высокотемпературного газа через пористую среду. В настоящей работе представлены две технологии расчёта и их тестирование для решения задачи о сублимации (газификации) твёрдого горючего потоком горячего газа. Постановка задачи основывалась на данных из работ [3–5].

Имеется газогенератор, в левой части которого расположен заряд горящего твёрдого топлива, а в правой — заряд твёрдого пористого горючего. При сгорании заряда твёрдого топлива в камере газогенератора создаётся поток горячих газов, которые проходят через пористый слой твёрдого горючего. При контакте с горячими газами это горючее подвергается сублимации, т. е. фазовому переходу из твёрдого в газообразное состояние без плавления твёрдого вещества. При этом в слое твёрдого горючего температура газов уменьшается, а их масса увеличивается за счёт притока газообразных продуктов разложения исходного твёрдого горючего материала. Газы, которые покидают газогенератор, поступают в каналы рубашки охлаждения, где подвергаются дальнейшему нагреву, разлагаясь в итоге на более лёгкие углеводородные соединения, которые впоследствии поступают в камеру сгорания двигателя и, сгорая, истекают через сопло, тем самым создавая силу тяги.

В работе использованы два различных физико-математических подхода для моделирования фильтрации высокотемпературного газа через пористую среду с учётом сублимации твёрдого горючего. В первом случае математическая модель пористой среды представляется в двухфазной постановке с использованием модели взаимопроникающих континуумов. Задача рассматривалась в равновесном приближении, для расчёта теплопроводности в пористой среде использовалась эффективная теплопроводность, а нестационарный член включал тепловую инерцию твёрдой фазы. Назовём этот подход континуальной постановкой. В качестве газовой среды использовался азот, а твёрдой фазы — полиметилметакрилат (ПММА). Остальные константы модели выбирались аналогично работе [2]. Для нахождения источника члена в уравнении сохранения массы, решения уравнения для конверсии твёрдого топлива и вычисления изменения пористости применялись пользовательские функции Ansys Fluent (User Defined Function).

Во втором случае пористая среда задавалась в явном виде с выделением границы двух сред. Для моделирования сублимации твёрдого вещества был использован подход, основанный на модели плавления и кристаллизации [6–8]. В рамках данного подхода фазовое состояние вещества определяется соответствующей предельной температурой. Вещество, находящееся при промежуточных температурах (частично затвердевшая область), рассматривается как пористая среда. Пористость в каждой ячейке устанавливается равной жидкой фракции в этой ячейке. Назовём этот подход прямой постановкой с выделением границы двух сред.

## 1. Постановка задачи

Оба подхода к решению задачи проводились в двумерном приближении. В континуальной постановке рассматривался канал длиной 0.5 м. На входе варьировался расход газа (азот), чтобы обеспечить скорость потока в канале в пределах 0.5 м/с. Давление на выходе из канала задавалось равным  $P = 2$  МПа. Температура газа на входе —  $T = 1500$  К. Сверху и снизу канал ограничивался стенками. В начальный момент времени во всём объёме канала задавалась постоянная пористость  $\gamma = 0.3$ . Использовалась структурированная расчётная сетка. Расчёты по сходимости решения по расчётной сетке позволили выбрать размер элементов сетки 1 мм.

Схема расчётной области для численного решения задачи в прямой постановке представлена на рис. 1. На левой границе в качестве граничных условий задавалось истечение модельного газа с постоянными параметрами и расходом, соответствующими континуальной постановке:  $P = 2$  МПа,  $T = 1500$  К. На правой границе ставились условия постоянства полного давления и температуры. На верхней и нижней границе — условия симметрии (нулевых градиентов). В качестве начальных условий в расчётной области задавалось давление 2 МПа, температура 300 К и нулевая скорость. Во внутренней прямоугольной области (рис. 1) задавались параметры среды, соответствующие заряду модельного твёрдого горючего. Так же, как и в первом подходе, использовалась структурированная расчётная сетка, состоящая из элементов квадратной формы. Размер элементов уменьшался в области границы раздела двух сред и составлял примерно 0.34 мм. Расчёты проводились для различных геометрических характеристик газификатора. На рис. 1 схематически представлены основные геометрические параметры расчётной области, такие как: длина твёрдого горючего ( $L$ ), толщина твёрдого горючего ( $H$ ), толщина газовой области ( $h$ ).



Рис. 1. Геометрические параметры расчётной области

Длина  $L = 0.5$  м оставалась неизменной в каждом расчёте, а величины  $H$  и  $h$  варьировались, однако их отношение оставалось постоянным. Это отношение определяло пропускную способность рассматриваемой конструкции. Пропускная способность, которая является аналогом пористости, определялась как отношение объёма газообразного вещества (в нашем случае площадь) в участке канала длиной  $L$ , где располагалось твёрдое вещество, к объёму всего канала (площади). В итоге, произведя необходимые сокращения, имеем следующее соотношение:

$$\sigma = \frac{h}{h + H}.$$

Таким образом, при варьировании геометрических параметров расчётной области пропускная способность канала составляла примерно  $\sigma = 0.3$ .

## 2. Математическая модель

Математическая модель пористой среды в данной работе представляется в двухфазной постановке с использованием модели взаимопроникающих континуумов и прямом расчёте сублимации на основе модели плавления и кристаллизации [6–8]. Модель взаимопроникающих континуумов может использоваться для решения широкого круга однофазных и многофазных задач, включая течения через уплотнён-

ные слои, перфорированные пластины и в том числе для решения задачи газификации твёрдого топлива, представленного в виде пористого материала. В этом случае исследуется динамика процесса взаимодействия газа с пористой средой с изменяющейся по некоторому закону пористостью. Таким образом, данная математическая модель обладает следующими особенностями:

1. Модель основана на подходе механики многофазных сред с учётом взаимопроникновения континуумов.

2. Основные уравнения вытекают из законов сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются уравнениями состояния идеального газа и законами тепло- и массообмена.

3. Учёт газификации твёрдого топлива производится через источниковый член в уравнении неразрывности.

В пакете Ansys Fluent, использованном для расчётов в настоящей работе, в модели пористой среды для однофазных и многофазных потоков по умолчанию скорость рассчитывается на основе объёмного расхода в пористой области. Такое представление скорости обычно позволяет хорошо предсказывать потери давления в пористой области. Однако, поскольку значения приведённой скорости в пористой зоне остаются такими же, как и за пределами этой области, такой подход не может предсказать увеличение скорости в пористых зонах и, следовательно, ограничивает точность модели. Для более точного моделирования течений в пористой среде становится необходимым определять истинную или физическую скорость потока, а не приведённую скорость, а также добавлять пористость во все члены уравнений сохранения.

Модель, использующая физическую скорость потока, включает в себя уравнения для законов сохранения массы и импульса и может быть представлена в следующем виде:

$$\frac{\partial(\gamma\rho_g)}{\partial t} + \nabla(\gamma\rho_g\vec{v}) = \rho_{s0}W,$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho_g\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\gamma\rho_g\vec{v}\vec{v}) = -\gamma\nabla p + \nabla(\gamma\bar{\tau}) - \left(\frac{\gamma^2\mu}{K}\vec{v}\right).$$

Уравнение энергии может быть записано в двух приближениях: равновесном и неравновесном. В равновесном приближении считается, что пористая среда и поток жидкости находятся в тепловом равновесии, для расчёта теплопроводности в пористой среде используется эффективная теплопроводность, а нестационарный член включает тепловую инерцию твёрдой фазы в среде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_g E_g + (1-\gamma)\rho_s E_s) + \nabla(\vec{v}(\rho_g E_g + p)) = S_g^h + \nabla[k_{eff}\nabla T - (\sum_i h_i J_i) + (\bar{\tau} \cdot \vec{v})].$$

Здесь  $\rho_g$  — плотность газа;  $\rho_s$  — плотность твёрдой фазы;  $\vec{v}$  — вектор скорости;  $\gamma$  — пористость;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $K$  — коэффициент проницаемости;  $p$  — давление;  $\bar{\tau}$  — тензор вязких напряжений;  $W$  — скорость химической реакции;  $E_g$  — полная энергия газа;  $E_s$  — полная энергия твёрдой фазы;  $S_g^h$  — источниковый член;  $k_{eff}$  — эффективная теплопроводность среды,  $k_{eff} = \gamma k_g + (1-\gamma)k_s$ .

В неравновесном приближении, когда предполагается, что пористая среда и поток жидкости не находятся в тепловом равновесии, используется подход с двумя средами. При таком подходе определяется зона твёрдой фазы, которая пространственно совпадает с пористой зоной среды, и эта твёрдая зона взаимодействует с потоком только через теплообмен. Уравнения сохранения энергии решаются отдельно для газовой и твёрдой фазы. Уравнение сохранения энергии для газа имеет

вид

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_g E_g) + \nabla (\vec{v} (\rho_g E_g + p)) = S_g^h + \nabla \left[ \gamma k_g \nabla T_g - \left( \sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + h_{fg} A_{fg} (T_s - T_g), \quad (1)$$

а уравнение сохранения энергии для твёрдой фазы —

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1 - \gamma) \rho_s E_s) = S_s^h + \nabla [(1 - \gamma) k_s \nabla T_s] + h_{fg} A_{fg} (T_g - T_s).$$

На данном этапе исследования использовано равновесное приближение.

Скорость химической реакции описывается уравнением  $W = (1 - \eta) k e^{-\frac{E}{RT}}$ , где  $\eta$  — степень конверсии твёрдого топлива;  $k$  — предэкспоненциальный множитель;  $E$  — энергия активации. Степень конверсии твёрдого топлива рассчитывается по формуле

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = W.$$

Динамическая вязкость вычисляется по аппроксимации Сазерленда.

В качестве газовой среды использовался азот, а твёрдой фазы — полиметилметакрилат (ПММА). Остальные константы модели выбирались аналогично работе [1]. Для нахождения источников члена в уравнении сохранения массы, решения уравнения для конверсии твёрдого топлива и вычисления изменения пористости применялись пользовательские функции Ansys Fluent (User Defined Function).

В случае прямого моделирования сублимации для движения газообразного вещества решались уравнения, описывающие законы сохранения массы импульса и энергии. В общем виде они могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}),$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - h \vec{j}),$$

где  $\rho$  — плотность;  $\vec{v}$  — вектор скорости;  $p$  — статическое давление;  $k_{\text{eff}}$  — эффективная теплопроводность;  $h$  — энтальпия;  $\vec{j}$  — диффузионный поток;  $\bar{\tau}$  — тензор напряжений, выражаемый формулой

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right].$$

Здесь  $\mu$  — динамическая вязкость;  $I$  — единичный тензор. Полная энергия определяется как

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}.$$

Система уравнений дополнялась уравнением состояния идеального газа

$$\rho = \frac{p}{RT},$$

где  $R$  — индивидуальная газовая постоянная,  $M_w$  — молекулярный вес.

Для твёрдой фазы закон сохранения энергии имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_d h_d) + \nabla \cdot (\rho_d \vec{v} h_d) = \nabla \cdot (k \nabla T_d),$$

где  $\rho_d$  — плотность вещества;  $k$  — теплопроводность твёрдого вещества;  $T_d$  — температура;  $h_d$  — энтальпия, определяемая как

$$h_d = h_{\text{dref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p_d} dT_d.$$

Моделирование фазового перехода из твёрдого в газообразное состояние осуществлялось следующим образом. Устанавливались предельные температуры, при которых вещество полностью переходит из одного состояния в другое. Вещество, находящееся при промежуточных температурах (частично затвердевшая область), рассматривается как пористая среда. Пористость этой среды в каждой ячейке устанавливается равной объёмной доле газа и зависит от температуры:

$$\beta = 0, \quad T < T_{\text{solidus}},$$

$$\beta = 1, \quad T > T_{\text{sublim}},$$

$$\beta = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{sublim}} - T_{\text{solidus}}}, \quad T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{sublim}},$$

где  $T_{\text{solidus}}$  — температура затвердевания вещества;  $T_{\text{sublim}}$  — температура сублимации вещества.

Теплоёмкость и теплопроводность вещества задавались температурно-зависимыми при помощи кусочно-линейной функции. Эта функция задавалась таким образом, что при  $\beta = 0$  теплоёмкость и теплопроводность совпадали с таковыми для твёрдого вещества, при  $\beta = 1$  — для азота. Для промежуточных температур ( $T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{sublim}}$ ) теплоёмкость и теплопроводность вещества задавались как некоторая комбинация с поправкой на объёмную долю твёрдого и жидкого вещества.

### 3. Результаты расчётов

#### 3.1. Континуальная модель

Выполнены расчёты течения высокотемпературного газа через пористую среду с сублимацией твёрдого горючего. Расчёты приведены для двух вариантов расхода газа на входе в расчётную область: 0.05 и 0.1 кг/с. Такие расходы соответствуют скорости потока на входе 0.22 и 0.44 м/с соответственно. На рис. 2 показаны поля температуры в различные моменты времени для расхода газа на входе в канал, равного 0.05 кг/с. Из рисунка видно, как происходит прогрев пористой среды с течением времени. В момент времени 110 секунд происходит полная конверсия твёрдой фазы и канал полностью заполняется высокотемпературным потоком.

Двумерное распределение скорости в различные моменты времени для того же расхода, что и на предыдущей картине, показано на рис. 3. Во-первых, на рисунке можно увидеть, что поток ускоряется в пористой среде. Однако по мере газификации твёрдой фазы скорость начинает уменьшаться и достигает исходной скорости около 0.2 м/с, обусловленной расходом газовой фазы. Во-вторых, из рисунка видно

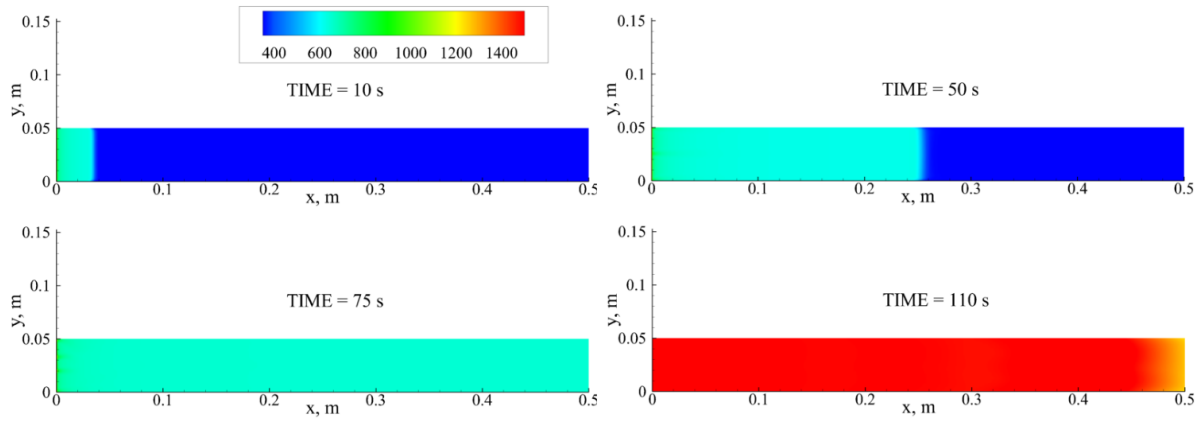


Рис. 2. Поля температуры в различные моменты времени

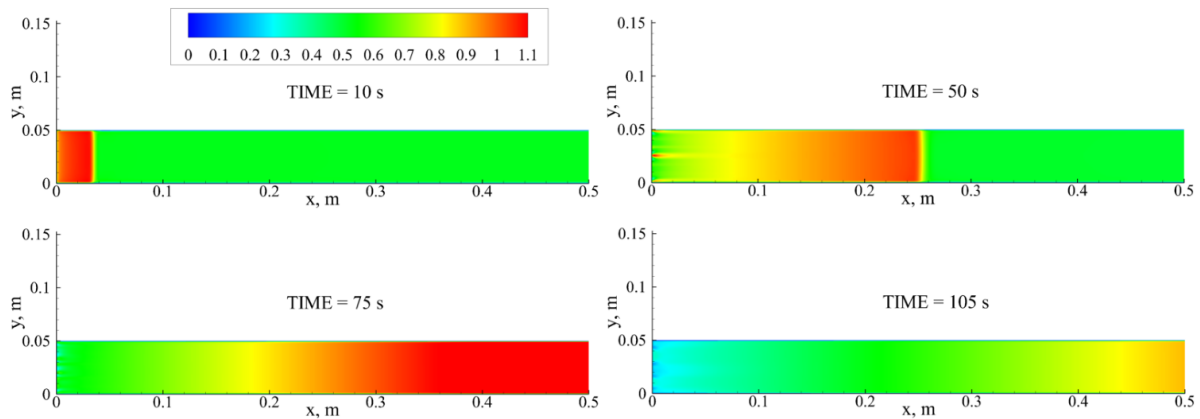


Рис. 3. Поля скорости в различные моменты времени

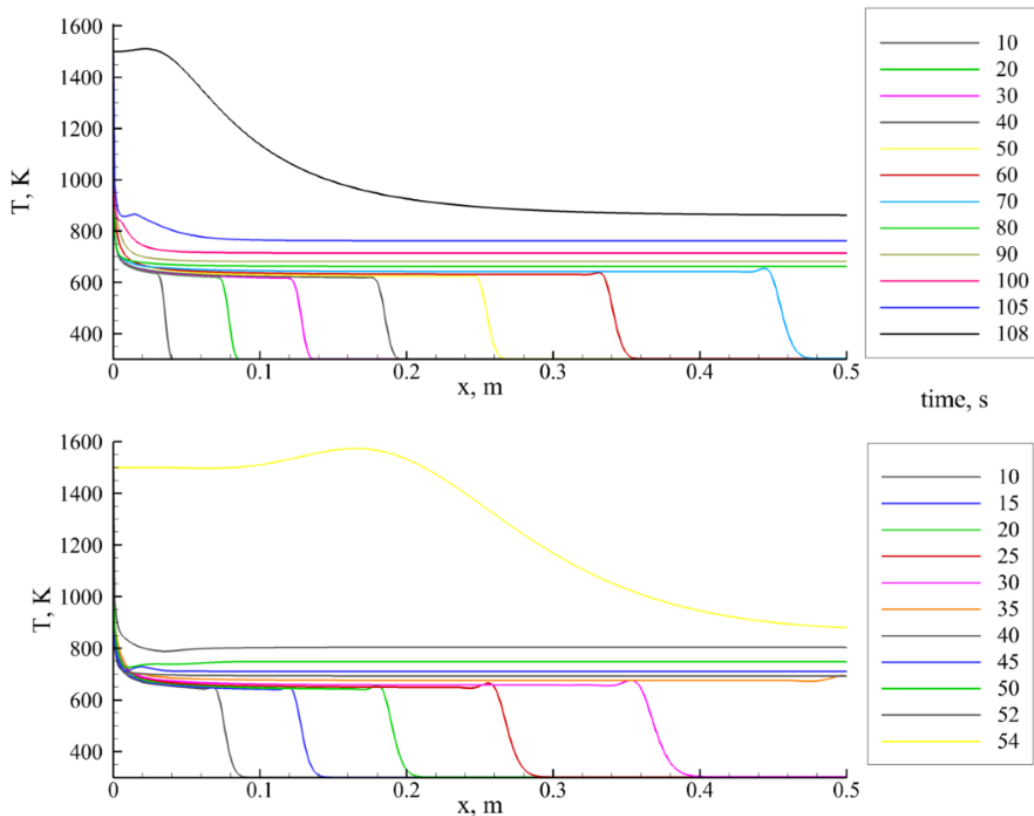


Рис. 4. Распределение температуры на оси канала в различные моменты времени для массовых расходов 0.05 кг/с (верхний график) и 0.1 кг/с (нижний график)

наличие пограничного слоя на стенках канала. В целом можно сказать, что двумерность слабо проявляется в картинах течения.

Распределение температуры вдоль оси симметрии канала в различные моменты времени приведено на рис. 4. Здесь показаны случаи, соответствующие массовому расходу 0.05 и 0.1 кг/с. Видно, как тепловая волна распространяется по пористой среде. Причём на начальных стадиях процесса из-за активного притока массы за счёт сублимации горючего температура не превышает 700 К. Далее по мере нарастания степени конверсии твёрдого топлива происходит рост температуры двухфазной среды. Можно отметить локальный максимум температуры, обусловленный торможением потока на финальной стадии конверсии твёрдой фазы.

Уместно привести распределение продольной скорости на линии симметрии канала в зависимости от времени. Рис. 5 показывает продольную компоненту скорости для двух расходов газа. На нём можно видеть значительный рост скорости потока в пористой среде. На финальных стадиях процесса скорость практически линейно возрастает по длине канала. К моменту полного превращения твёрдой фазы в газ скорость начинает снижаться и приходит к значению, соответствующему заданному расходу. Из рисунка видно, что увеличение расхода в два раза приводит к соответствующему росту скорости в канале на всех стадиях процесса.

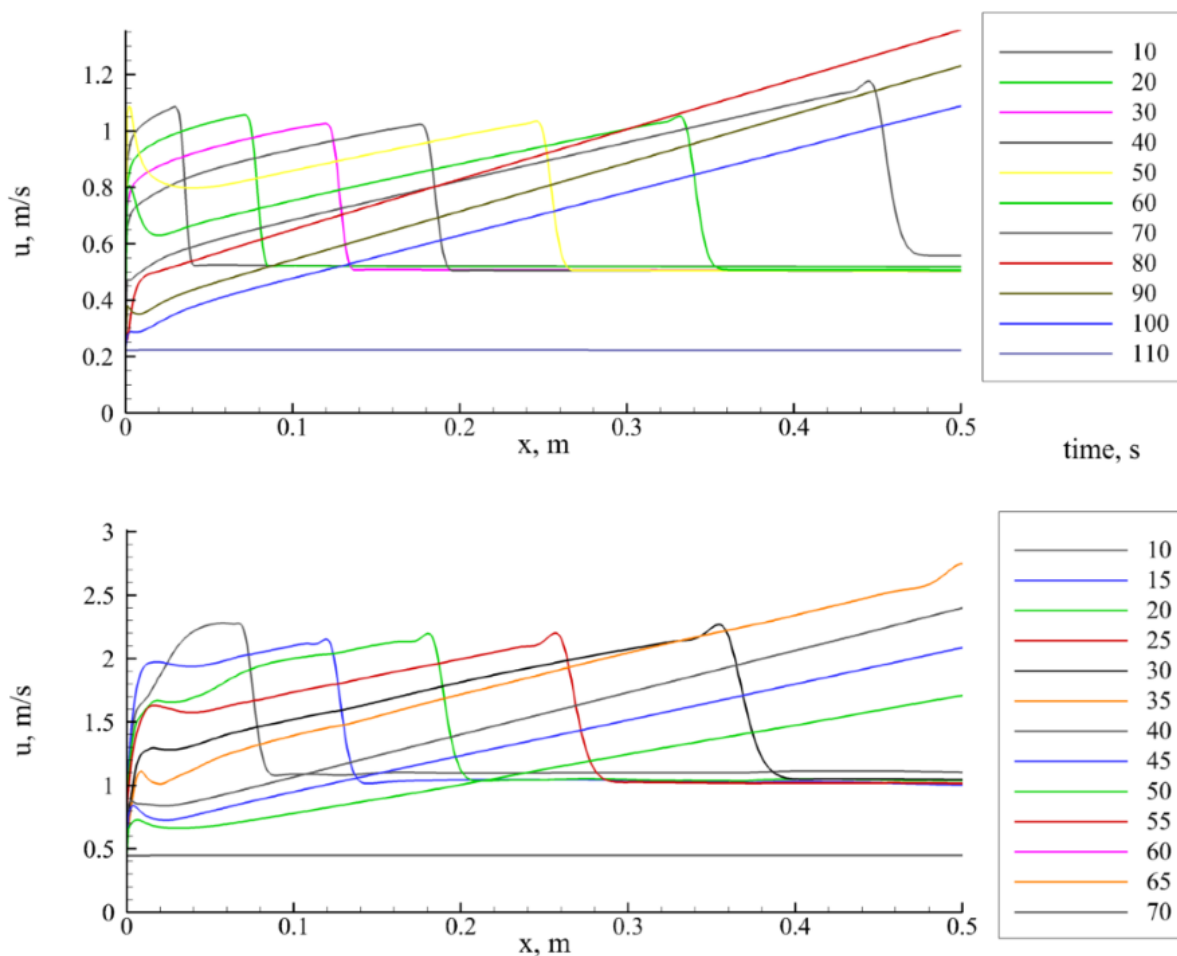


Рис. 5. Распределение скорости на оси канала в различные моменты времени для массовых расходов 0.05 кг/с (верхний график) и 0.1 кг/с (нижний график)

Степень газификации твёрдого топлива в зависимости от времени показана на рис. 6. Видно, что увеличение расхода в два раза приводит к примерно двукратному увеличению скорости сублимации горючего.

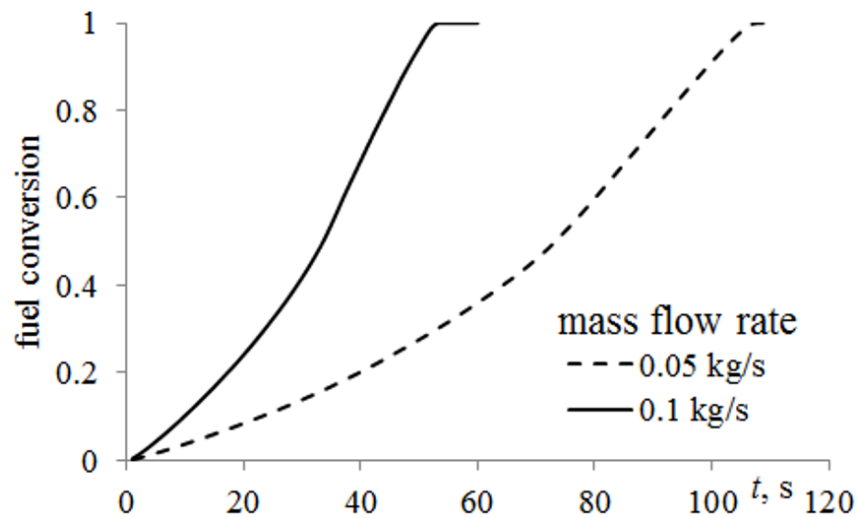


Рис. 6. Степень газификации твёрдой фазы в зависимости от времени

### 3.2. Прямое моделирование сублимации с выделением границы двух сред

Для прямого моделирования сублимации твёрдого вещества были выбраны следующие параметры:  $H = 0.04$  м и  $h = 0.02$  м, скорость потока горячего газа —  $V_0 = 0.44$  м/с. Интенсивность сублимации определяется интенсивностью прогрева твёрдого вещества. На рис. 7 представлено распределение температуры в твёрдом теле в различные моменты времени. Видно, как с течением времени происходит прогрев всего вещества, а наиболее интенсивный прогрев наблюдается на переднем торце твёрдого тела. Зона повышенных температур на рис. 7 соответствует переходу твёрдого вещества в газообразное состояние, распределение объёмной концентрации газообразного вещества представлено на рис. 8. В результате полная сублимация твёрдого вещества наступает через 48.5 с. Как видно из рис. 8, передняя часть твёрдого тела газифицируется неравномерно. Такое поведение вызвано неравномерностью обтекания потоком твёрдого тела. На рис. 9 представлено поле скорости для переднего края твёрдого тела в начальный момент времени. Видно, что при обтекании передней части твёрдого тела происходит поджатие потока, его завихрение и образование зоны пониженных температур за передним углом твёрдого тела. В результате прогрев тела и соответственно сублимация твёрдого вещества происходят неравномерно.

Далее проводилось параметрическое исследование влияния характеристик материала на скорость его сублимации. Скорость испарения твёрдого вещества зависит от скорости его прогрева, интенсивность которого обратно пропорциональна произведению плотности на его теплоёмкость. Таким образом, на интенсивность сублимации можно влиять изменением теплоёмкости вещества. На рис. 10 представлено распределение объёмной доли газифицированного вещества в различные моменты времени для увеличенной в 3 раза теплоёмкости вещества  $C_{pd} = 3 \cdot C_{pPMMA}$ .

Такое увеличение позволяет снизить интенсивность сублимации. Увеличение теплоёмкости вещества в 30 раз  $C_{pd} = 30 \cdot C_{pPMMA}$  приводит к ещё большему снижению газификации вещества. На рис. 11 представлено распределение объёмной доли газифицированного вещества в различные моменты времени для такого значения теплоёмкости.

Таким образом, изменяя параметры вещества, можно в значительной степени влиять на интенсивность его сублимации. На рис. 12 представлены зависимости степени газификации твёрдой фазы от времени для различных  $C_{pd}$ . Можно отметить,

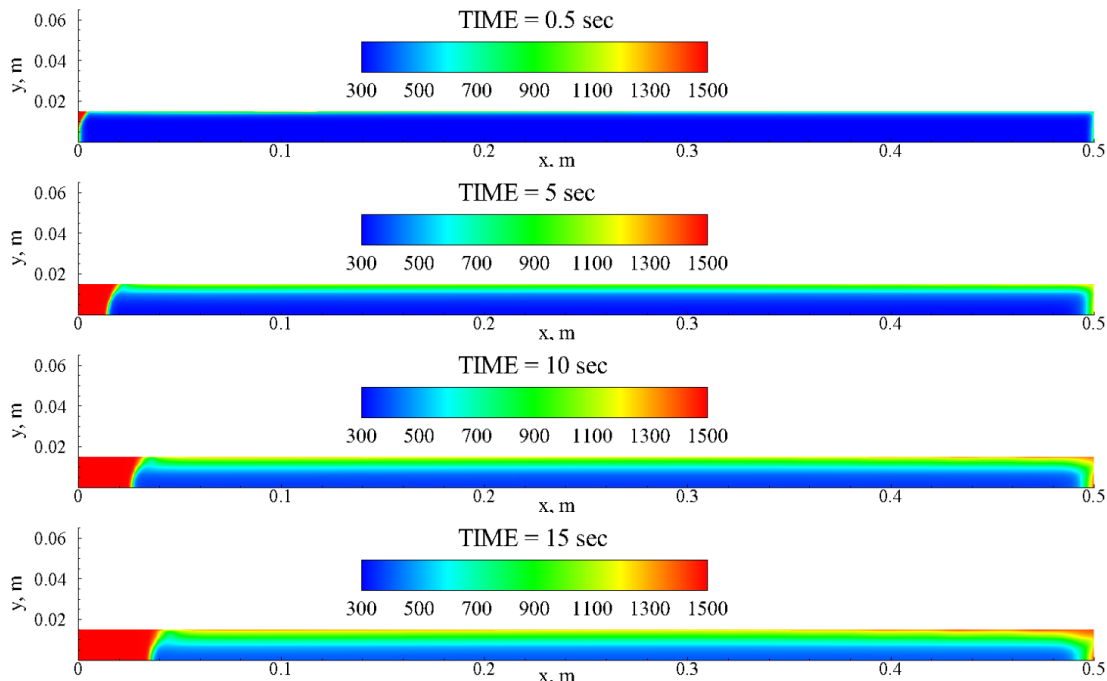


Рис. 7. Распределение температуры в твёрдом веществе

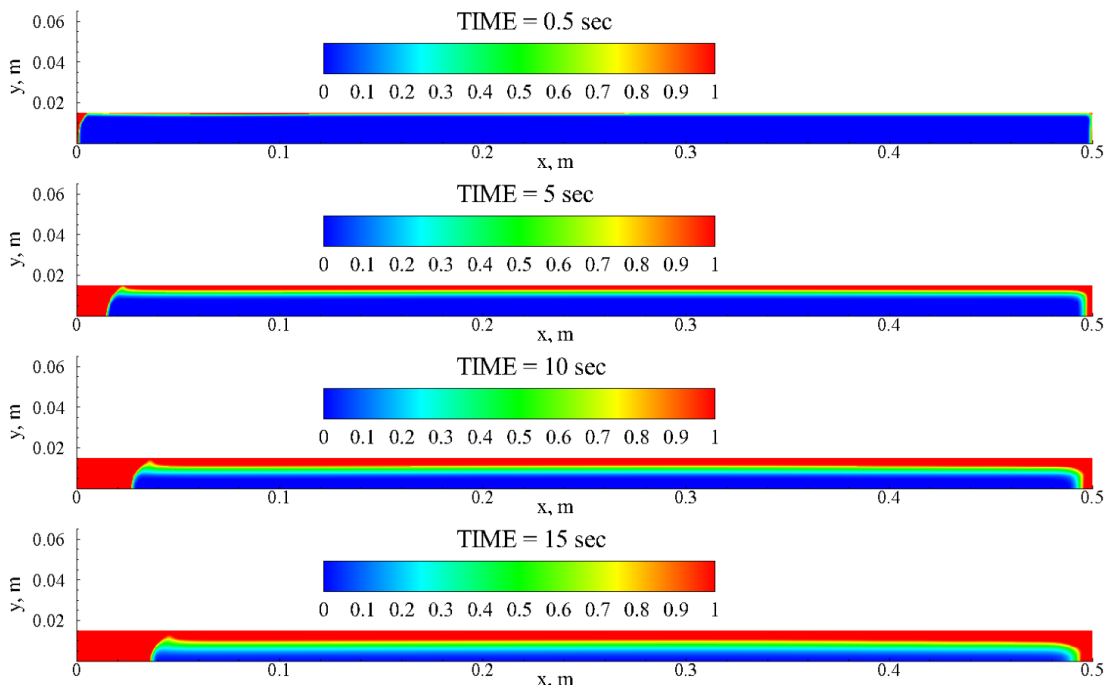


Рис. 8. Поля объёмной концентрации газообразного вещества

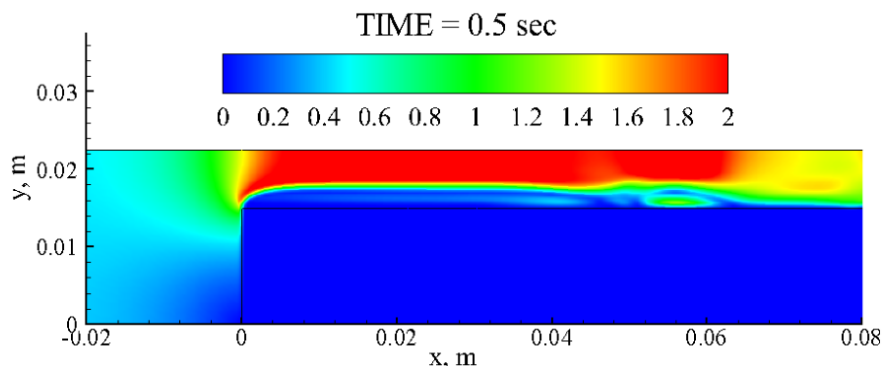


Рис. 9. Поле скорости газообразного вещества

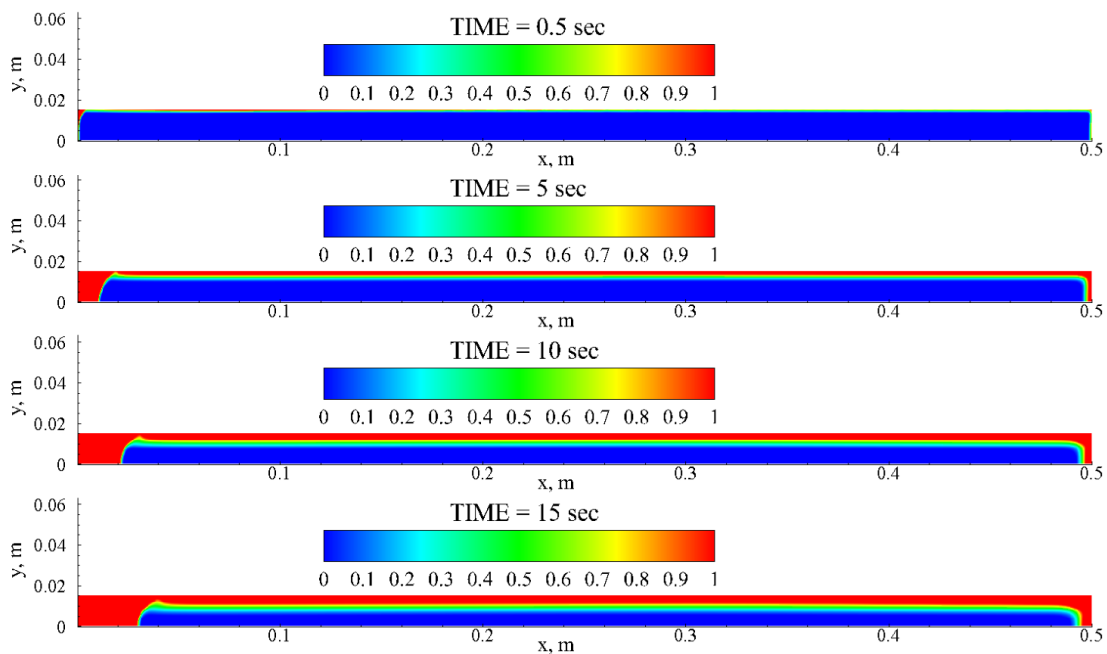
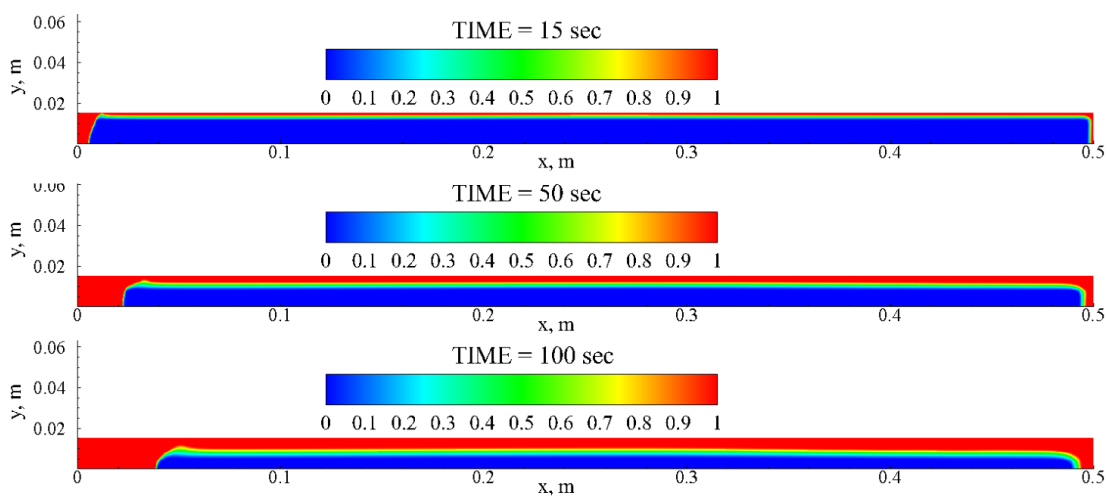
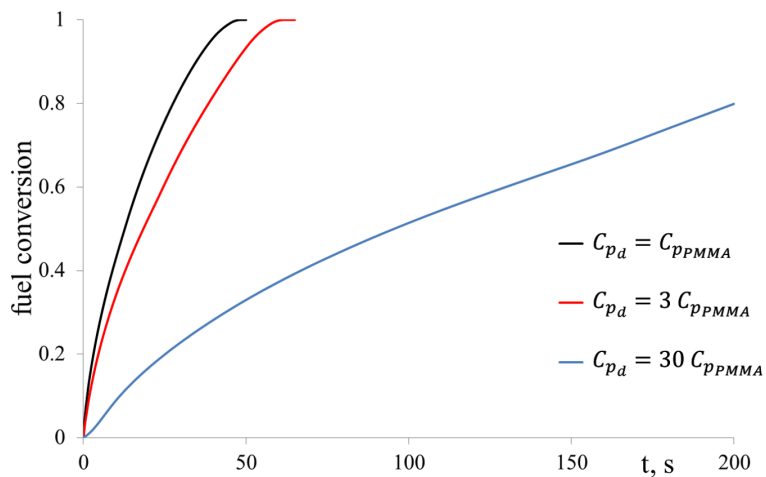
Рис. 10. Поля объёмной концентрации газообразного вещества при  $C_{pd} = 3 \cdot C_{pPMMA}$ Рис. 11. Поля объёмной концентрации газообразного вещества при  $C_{pd} = 30 \cdot C_{pPMMA}$ 

Рис. 12. Степень газификации твёрдой фазы в зависимости от времени при различных теплоёмкостях твёрдой фазы

что характерное время процесса сублимации твёрдой фазы сходно со временем, рассчитанным с использованием континуального подхода (см. рис. 6).

## 4. Выводы

1. Предложено два подхода для математического моделирования двухфазных течений в пористой среде: континуальный и с выделением границы двух сред.
2. На основе пакета программ Ansys Fluent создана вычислительная технология для моделирования сублимации твёрдого горючего в потоке высокотемпературного окислителя. Разработан набор пользовательских функций, расширяющий функционал Ansys Fluent и позволяющий проводить расчёты пористой среды с газификацией твёрдой фазы и изменением пористости.
3. Выполнены параметрические расчёты динамики течения в пористой среде при сублимации твёрдой фазы.
4. Показано, что равновесная математическая модель, в которой предполагается равенство температур газообразной и твёрдой фазы, позволяет качественно правильно описать динамику процесса газификации твёрдого горючего в потоке высокотемпературного окислителя.
5. Для прямого моделирования сублимации с выделением границы двух сред выполнены расчёты динамики течения газа и сублимации твёрдого вещества для различных геометрических параметров расчётной области. Продемонстрирована возможность использования встроенных схем и решателей программного комплекса Ansys Fluent для проведения оценочных расчётов течений с фазовыми превращениями.
6. Показано, что, несмотря на неизменную пропускную способность канала (пористость), его геометрические параметры оказывают существенное влияние на характер течения, скорость прогрева и сублимации твёрдого горючего.
7. Выявлено сходство характерных времён процесса сублимации, рассчитанных с использованием двух подходов.

## Список литературы

1. **Байков А. В., Пешкова А. В., Шиховцев А. В., Яновский Л. С.** Экспериментальные исследования низкотемпературного твердотопливного газогенератора для воздушно-реактивного двигателя // Горение и взрыв. 2016. Т. 9, № 4. С. 126–131.
2. **Яновский Л. С., Байков А. В., Аверьков И. С.** Оценка возможности создания ВРД на твёрдом топливе с системой активного охлаждения // Тепловые процессы в технике. 2016. № 3. С. 111–116.
3. **Левин В. А., Луценко Н. А., Салганский Е. А., Яновский Л. С.** Модель газификации твёрдого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора летательного аппарата // Докл. Акад. наук. 2018. Т. 482, № 2. С. 150–154.
4. **Salgansky E. A., Lutsenko N. A., Levin V. A., Yanovskiy L. S.** Modeling of solid fuel gasification in combined charge of low-temperature gas generator for high-speed ramjet engine // Aerospace Science and Technology. 2019. Vol. 84. P. 31–36.
5. **Salgansky E. A., Lutsenko N. A.** Effect of solid fuel characteristics on operating conditions of low-temperature gas generator for high-speed flying vehicle // Aerospace Science and Technology. 2021. Vol. 109, no. 106420.
6. **Voller V. R.** Modeling solidification processes. Technical report. In: Mathematical Modeling of Metals Processing Operations Conference. Palm Desert: American Metallurgical Society, 1987.
7. **Voller V. R., Brent A. D., Reid K. J.** A computational modeling framework for the analysis of metallurgical solidification process and phenomena. Technical report. In: Conference for Solidification Processing, Sheffield, 1987.

8. **Voller V. R., Swaminathan C. R.** Generalized source-based method for solidification phase change // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. 1991. Vol. 19, no. 2. P. 175–189.

*Поступила в редакцию 14.06.2022.*

*После переработки 17.08.2022.*

#### Сведения об авторах

**Бедарев Игорь Александрович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией волновых процессов в ультрадисперсных средах Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия; Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия; e-mail: bedarev@itam.nsc.ru

**Темербеков Валентин Макарович**, младший научный сотрудник лаборатории волновых процессов в ультрадисперсных средах Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия; Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия; e-mail: www.tvm94@gmail.com

## NUMERICAL MODELING OF THE SOLID FUEL SUBLIMATION IN A HIGH-TEMPERATURE GAS FLOW IN THE CONTINUUM APPROACH AND WITH BOUNDARY SEPARATION BETWEEN TWO MEDIA

I.A. Bedarev<sup>1,2,a</sup>, V.M. Temerbekov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia*

<sup>a</sup>*bedarev@itam.nsc.ru*

Two approaches are proposed for the numerical simulation of two-phase flows in a porous medium, taking into account the gasification of the solid phase. In the first case, the mathematical model of a porous medium is represented in a two-phase formulation using the model of interpenetrating continua. Arrhenius kinetics was used to take into account the sublimation of fuel. In the second case, the porous medium was specified explicitly with separation of the boundary between the two media, and an approach based on the melting and crystallization model was used to simulate the sublimation of a solid. For both approaches, computational technologies have been created to simulate the sublimation of a solid fuel in a high-temperature oxidizer flow. Parametric calculations of the flow dynamics in a porous medium during sublimation of the solid phase have been carried out. It is shown that the continual equilibrium mathematical model, in which the temperatures of the gaseous and solid phases are assumed to be equal, makes it possible to qualitatively correctly describe the dynamics of the process of gasification of a solid fuel in a high-temperature oxidizer flow. The similarity of the characteristic times of the sublimation process calculated using two approaches is revealed.

**Keywords:** *mathematical modeling, non-stationary processes, gas generator, solid fuel, gasification, sublimation.*

## References

1. Baykov A.V., Peshkova A.V., Shikhovtsev A.V., Yanovskiy L.S. Eksperimental'nye issledovaniya nizkotemperaturnogo tverdotoplivnogo gazogeneratora dlya vozdušno-reaktivnogo dvigatelya [Experimental studies of a low-temperature solid-fuel gas generator for an air-jet engine]. *Goreniye i vzryv* [Combustion and explosion], 2016, vol. 9, no. 4, pp. 126–131. (In Russ.).
2. Yanovskiy L.S., Baykov A.V., Averkov I.S. Otsenka vozmozhnosti sozdaniya VRD na tvyordom toplive s sistemoy aktivnogo okhlazhdeniya [Estimation of possibility of creating a solid fuel air breathing jet engine with active cooling system]. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2016, vol. 8, no. 3, pp. 111–116. (In Russ.).
3. Levin V.A., Lutsenko N.A., Salgansky E.A., Yanovskiy L.S. A model of solid-fuel gasification in the combined charge of a low-temperature gas generator of a flying vehicle. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, no. 9, pp. 375–379.

---

The reported study was funded by the Russian Science Foundation grant no. 21-79-20008, <https://rscf.ru/project/21-79-20008/>. The work was performed using the equipment of the Center for Collective Use of Ultra-High-Performance Computing Resources of Lomonosov Moscow State University.

4. **Salgansky E.A., Lutsenko N.A., Levin V.A., Yanovskiy L.S.** Modeling of solid fuel gasification in combined charge of low-temperature gas generator for high-speed ramjet engine. *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 84, pp. 31–36.
5. **Salgansky E.A., Lutsenko N.A.** Effect of solid fuel characteristics on operating conditions of low-temperature gas generator for high-speed flying vehicle. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 109, no. 106420.
6. **Voller V.R.** Modeling solidification processes. Technical report. In: *Mathematical Modeling of Metals Processing Operations Conference*. Palm Desert, American Metallurgical Society, 1987.
7. **Voller V.R., Brent A.D., Reid K.J.** A Computational Modeling Framework for the Analysis of Metallurgical Solidification Process and Phenomena. Technical report. In: *Conference for Solidification Processing Ranmoor House*, Sheffield, 1987.
8. **Voller V.R., Swaminathan C.R.** Generalized source-based method for solidification phase change. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 19, no. 2, pp. 175–189. 1991.

*Article received 14.06.2022.*

*Corrections received 17.08.2022.*