

УДК 621.454.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ДВУХСЛОЙНОГО ПОРИСТОГО ПОЛИМЕРА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ

К. Г. Боровик<sup>1,2</sup>, Н. А. Луценко<sup>1,2</sup>, С. С. Фецов<sup>1,2</sup>, Е. А. Салганский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток, ksushareno@mail.ru

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН  
142432 Черногловка

С использованием разработанных математической модели и вычислительного алгоритма, реализованного в прикладном пакете OpenFOAM, изучена газификация двухслойного твердого пористого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора. В ходе вычислительных экспериментов исследовалось влияние двухслойности твердого пористого горючего на процесс его газификации на примере газификаторов, содержащих горючее из полиметилметакрилата и полиэтилена с различным взаимным расположением их слоев. Показано, что в двухслойном горючем могут одновременно распространяться две волны газификации, вследствие чего относительный массовый расход продуктов газификации может иметь два локальных максимума. Время работы газогенератора на двухслойном пористом горючем неоднозначно зависит от взаимного расположения слоев и может выходить из диапазона между временами работы газификатора на каждом из горючих.

Ключевые слова: газогенератор, газификация, двухслойное горючее, полиметилметакрилат, полиэтилен.

DOI 10.15372/FGV2022.9274

### ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературные газогенераторы широко применяются в различных приложениях: в системах пожаротушения [1–3], для раскрутки турбин [4–6], в подушках безопасности [7, 8] и др. В зависимости от области применения к газогенератору предъявляются различные требования: отсутствие горючих продуктов [9], высокая производительность при минимальной теплоте сгорания [10], максимальная калорийность газообразных продуктов [11–13]. Закономерности газификации веществ в газогенераторе исследуются как методами математического моделирования [14–18], так и экспериментально [19, 20].

Низкотемпературные газогенераторы должны создавать поток газа низкой температуры. Как правило, газогенератор состоит из двух частей — источника потока горячего газа

и охладителя [21–23]. Источником горячего газа могут быть твердое топливо, газовая горелка и другие устройства [24, 25]. В качестве охладителя может быть использован твердый пористый материал, который при нагреве подвергается сублимации. При сублимации материал переходит в газообразное состояние без плавления [26, 27]. Отсутствие плавления необходимо для сохранения пор и поддержания фильтрации потока газа через твердый пористый охладитель [28, 29]. За счет теплообмена потока горячего газа с охладителем происходит нагрев материала с последующим фазовым переходом. Фазовый переход в охладителе реализуется с поглощением тепла, при этом температура общего потока газа снижается.

Известно, что закономерности термодеструкции веществ определяются температурными условиями процесса, а также природой самих веществ [30–32]. Целью настоящей работы является исследование закономерностей газификации двухслойного пористого горючего, каждый слой которого состоит из отдельного полимера, в низкотемпературном газогенераторе.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 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.

© Боровик К. Г., Луценко Н. А., Фецов С. С.,  
Салганский Е. А., 2023.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Составной частью низкотемпературного газогенератора, в которой непосредственно происходит газификация, является газификатор, содержащий в начальный момент времени пронизаемое твердое горючее. Газификатор представляет собой пористый объект с непроницаемыми боковыми стенками. Вход и выход газификатора расположены друг против друга. В газификатор поступает горячий инертный газ, при взаимодействии с которым твердое пористое горючее газифицируется. Продукты газификации пористого горючего смешиваются с поступающим газом и вместе с ним выходят из газификатора.

В настоящей работе построена численная модель, которая позволяет исследовать процесс газификации твердого пористого горючего, состоящего из смеси двух полимеров, при произвольно задаваемой в каждой точке объекта начальной объемной концентрации каждого из двух компонентов твердого горючего. Заметим, что при использовании данной модели для расчета двухслойного горючего необходимо в каждом слое задать концентрацию одного из горючих полимеров равной 1, а другого — нулю. Математическая модель процесса базируется на идее взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [33] и включает в себя законы сохранения в дифференциальной форме для твердой и газовой фаз.

В уравнении сохранения энергии для твердой среды учитываются контактный теплообмен с газом, теплопоглощение, пропорциональное скорости химической реакции, и теплопроводность твердой фазы:

$$(a_{c1}\rho_{c1}c_{c1} + a_{c2}\rho_{c2}c_{c2}) \frac{\partial T_c}{\partial t} = -\alpha(T_c - T_g) - \\ - (Q_1 a_{c10}\rho_{c1}W_1 + Q_2 a_{c20}\rho_{c2}W_2) + \\ + \nabla \cdot ((a_{c1}\lambda_{c1} + a_{c2}\lambda_{c2}) \nabla T_c).$$

В уравнении сохранения энергии для газа кроме конвективного теплообмена учитываются теплообмен с твердой средой и теплопроводность газа:

$$a_g\rho_g c_g \left( \frac{\partial T_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) T_g \right) = \\ = \alpha(T_c - T_g) + \nabla \cdot (a_g \lambda_g \nabla T_g).$$

Здесь  $a$  — объемная концентрация,  $\rho$  — истинная плотность,  $c$  — удельная теплоемкость,  $T$  — температура,  $t$  — время,  $\alpha$  — коэффициент межфазного теплообмена,  $Q$  — тепловой эффект реакции газификации,  $W$  — скорость реакции газификации,  $\lambda$  — теплопроводность,  $\mathbf{v}_g$  — скорость газа; индексы:  $c$  — конденсированная фаза,  $g$  — газ, 0 — начальное значение, 1 — горючее первого типа, 2 — горючее второго типа.

Уравнение сохранения импульса для газового компонента рассматриваемой среды используется для описания движения газа вместо классического уравнения Дарси:

$$a_g\rho_g(1 + \chi(1 - a_g)) \left( \frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) \mathbf{v}_g \right) = \\ = -a_g \nabla p - a_g^2 \frac{\mu}{k} \mathbf{v}_g - (a_{c10}\rho_{c1}W_1 + a_{c20}\rho_{c2}W_2) \mathbf{v}_g,$$

где  $\chi$  — коэффициент, определяющий инерционное взаимодействие сред из-за их относительного движения,  $p$  — давление газа,  $\mu$  — динамическая вязкость газа,  $k$  — проницаемость.

Так как твердая фаза полагается неподвижной, закон сохранения импульса для нее вырождается. Закон сохранения массы газа записывается в виде уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial a_g\rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (a_g\rho_g \mathbf{v}_g) = \\ = a_{c10}\rho_{c1}W_1 + a_{c20}\rho_{c2}W_2.$$

Закон сохранения массы твердой фазы записывается в виде уравнений для объемной концентрации каждого твердого горючего, также в модели учитывается изменение пористости:

$$a_{c1} = (1 - \eta_1)a_{c10}, \quad a_{c2} = (1 - \eta_2)a_{c20},$$

$$a_g = 1 - (a_{c1} + a_{c2}),$$

где  $\eta$  — степень газификации твердого горючего.

Молярная масса газовой смеси в каждой точке газификатора в каждый момент времени рассчитывается как среднее гармоническое молярных масс компонентов, что точно удовлетворяет закону Дальтона:

$$\frac{1}{M} = \frac{Y_{g1}}{M_1} + \frac{Y_{g2}}{M_2} + \frac{1 - Y_{g1} - Y_{g2}}{M_{in}},$$

где  $M$  — молярная масса газа,  $Y_g$  — массовая концентрация продуктов газификации твердого горючего, индекс  $in$  — значение на входе в газификатор.

Для расчета изменения молярной массы необходимо знать массовые концентрации продуктов газификации твердого горючего, которые определяются из дифференциальных законов сохранения массы для продуктов газификации:

$$\frac{\partial (a_g \rho_g Y_{g1})}{\partial t} + \nabla \cdot (a_g \rho_g Y_{g1} \mathbf{v}_g) = a_{c10} \rho_{c1} W_1,$$

$$\frac{\partial (a_g \rho_g Y_{g2})}{\partial t} + \nabla \cdot (a_g \rho_g Y_{g2} \mathbf{v}_g) = a_{c20} \rho_{c2} W_2.$$

Заметим, что диффузионный перенос в уравнениях не учитывается в силу его малости. Будем полагать, что для газа справедливо уравнение состояния совершенного газа, динамическая вязкость газа зависит от температуры по формуле Сазерленда [34], а теплопроводность газа определяется с помощью приближения Эйкена [35]:

$$p = \frac{\rho_g R T_g}{M}, \quad \mu = A_S \frac{T_g^{1.5}}{T_S + T_g},$$

$$\lambda_g = \mu \left( 1.32 \left( c_g - \frac{R}{M} \right) + 1.77 \frac{R}{M} \right),$$

где  $A_S$ ,  $T_S$  — константы в формуле Сазерленда,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Будем считать, что скорости реакций газификации описываются уравнением Аррениуса первого порядка:

$$W_1 = (1 - \eta_1) k_1 \exp \left( - \frac{E_1}{R T_c} \right), \quad \frac{\partial \eta_1}{\partial t} = W_1,$$

$$W_2 = (1 - \eta_2) k_1 \exp \left( - \frac{E_2}{R T_c} \right), \quad \frac{\partial \eta_2}{\partial t} = W_2,$$

где  $E$  — энергия активации,  $k_1$  — предэкспоненциальный множитель.

Граничные условия: на входе в газификатор известны скорость фильтрации и температура газа, а на выходе — давление газа, также на входе и выходе из газификатора известны условия теплообмена. Боковые стенки газификатора будем считать непроницаемыми и нетеплопроводными, их влиянием на течение в

газификаторе можно пренебречь в силу его малости, поэтому будем рассматривать одномерные процессы и не будем ставить краевые условия на боковых стенках. Учитывая, что входящий в газификатор инертный газ не содержит продуктов газификации твердого горючего, запишем граничные условия следующим образом:

$$-a_g v_{gn} \Big|_{x \in G_{in}} = u_{in}, \quad p \Big|_{x \in G_{out}} = p_{out},$$

$$T_g \Big|_{x \in G_{in}} = T_{g,in}, \quad \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{x \in G_{out}} = 0,$$

$$\frac{\partial T_c}{\partial n} \Big|_{x \in G_{in} \cup G_{out}} = 0,$$

$$Y_{g1} \Big|_{x \in G_{in}} = Y_{g2} \Big|_{x \in G_{in}} = 0,$$

где  $G_{in}$  и  $G_{out}$  — входная и выходная границы газификатора,  $n$  — внешний вектор нормали к границам  $G_{in}$  или  $G_{out}$ , индекс  $out$  — значение на выходе из газификатора.

Для решения задачи необходимо также задать значения параметров в начальный момент времени: будем полагать, что температуры твердой среды и газа равны 300 К, газ неподвижен, продукты газификации отсутствуют, так как реакция еще не начиналась.

Система уравнений с граничными условиями решается методом конечных объемов с помощью разработанного решателя для прикладного пакета OpenFOAM. В основе решателя лежит алгоритм SIMPLE, который предполагает нахождение на каждом шаге по времени таких значений давления внутри конечных объемов и массового потока через грани, которые гарантируют точное выполнение закона сохранения массы в каждой ячейке сетки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как настоящая работа посвящена исследованию влияния двухслойности твердого пористого горючего на процесс его газификации, то будем рассматривать горючее, состоящее из двух полимеров: полиэтилена (ПЭ) и полиметилметакрилата (ПММА). Параметры входящего горячего инертного газа соответствуют параметрам азота, длина газификатора равна  $H$ . Используемые в расчетах значения параметров приведены в таблице, при составлении которой использовались данные работ [36–40].

| Значения параметров                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $c_{ПЭ} = 3\,000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$                             |
| $c_{ПММА} = 2\,170 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$                           |
| $E_{ПЭ} = 2.44 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$                                          |
| $E_{ПММА} = 1.42 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$                                        |
| $k_{ПЭ} = 9.6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$                                         |
| $k_{ПММА} = 3.2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$                                          |
| $M_{ПЭ} = 0.028 \text{ кг/моль}$                                                    |
| $M_{ПММА} = 0.1 \text{ кг/моль}$                                                    |
| $Q_{ПЭ} = 1\,100 \text{ кДж/кг}$                                                    |
| $Q_{ПММА} = 870 \text{ кДж/кг}$                                                     |
| $\lambda_{ПЭ} = 0.35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$                          |
| $\lambda_{ПММА} = 0.185 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$                       |
| $\rho_{ПЭ} = 917 \text{ кг/м}^3$                                                    |
| $\rho_{ПММА} = 1\,170 \text{ кг/м}^3$                                               |
| $a_{g0} = 0.3$                                                                      |
| $c_g = 1.04 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$                       |
| $A_S = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0.5})$ |
| $T_S = 111 \text{ К}$                                                               |
| $H = 0.5 \text{ м}$                                                                 |
| $k_1 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$                                                 |
| $u_{in} = 0.5 \text{ м/с}$                                                          |
| $p_{out} = 2 \text{ МПа}$                                                           |
| $R = 8.3144 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$                                |
| $T_0 = 300 \text{ К}$                                                               |
| $T_{g,in} = 1\,500 \text{ К}$                                                       |
| $\alpha = 1.1 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с})$     |
| $\chi = 0.5$                                                                        |

Будем полагать, что заряд газификатора состоит из двух слоев одинаковой толщины: одна половина — ПММА, а другая — ПЭ. При этом будем рассматривать два случая: 1) ближе ко входу в газификатор располагается ПММА, а далее — ПЭ (случай ПММА + ПЭ), 2) ближе ко входу располагается ПЭ, а далее — ПММА (случай ПЭ + ПММА).

На рис. 1,а показан профиль степени газификации твердых двухслойных горючих ПЭ + ПММА и ПММА + ПЭ, а также отдельно каждого из полимеров ПЭ и ПММА через некоторое время после начала процесса. Видно, что в

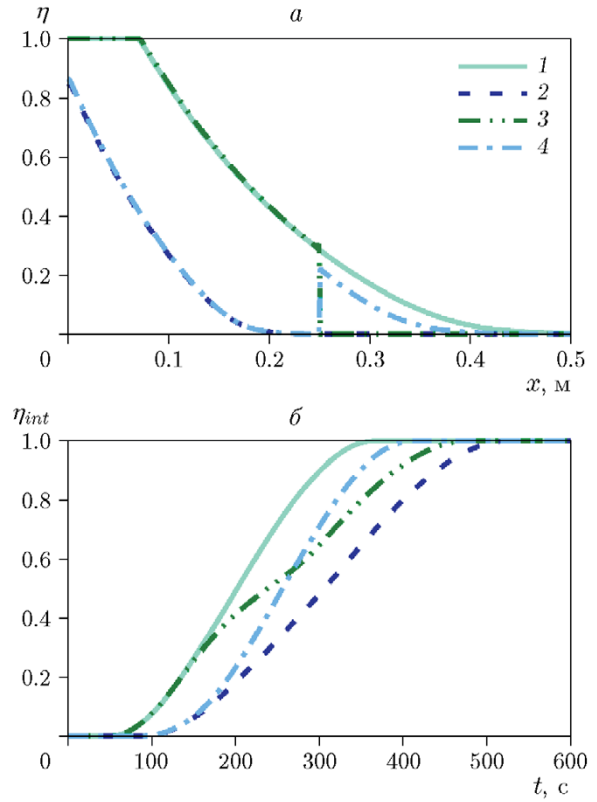


Рис. 1. Степень газификации твердого горючего через 180 с после начала процесса (а) и общая степень газификации (б) ПММА (1), ПЭ (2), ПММА + ПЭ (3), ПЭ + ПММА (4)

двухслойном горючем могут одновременно распространяться две волны газификации. В случае ПЭ + ПММА в слое ПММА процесс начинается раньше, чем газификация распространилась на весь первый слой (ПЭ).

На рис. 1,б показана общая степень газификации твердого горючего, которая определялась как среднее интегральное от степени газификации. Видно, что газификация двухслойных горючих протекает быстрее, чем чистого ПЭ, но медленнее, чем чистого ПММА. При этом в случае ПММА + ПЭ общая степень газификации вначале выше, чем в случае ПЭ + ПММА, и совпадает со степенью газификации чистого ПММА. В варианте ПЭ + ПММА в начальный период процесса общая степень газификации совпадает со степенью газификации чистого ПЭ, а через некоторое время оказывается выше, чем для ПММА + ПЭ. Это происходит из-за возникновения второй волны газификации и одновременного распространения волн газификации по слою ПЭ и слою ПММА.

Следует заметить, что так как на границе, разделяющей ПММА и ПЭ, резко изменя-

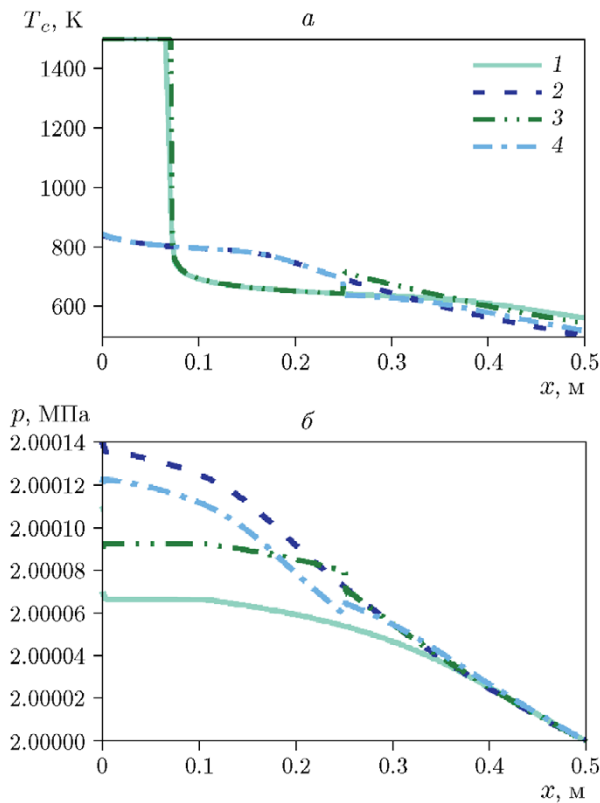


Рис. 2. Температура твердой среды (а) и давление газа (б) через 180 с после начала процесса для ПММА (1), ПЭ (2), ПММА + ПЭ (3), ПЭ + ПММА (4)

ется процесс газификации из-за различия скоростей конверсии этих горючих (что видно из рис. 1, а), то на этой границе могут резко изменяться не только пористость твердого горючего, давление и скорость газа, но и температура твердой среды. Это видно по рис. 2, где показаны температура твердой среды и давление газа через некоторое время после начала процесса.

Температура твердой среды может резко меняться на границе раздела слоев: в случае ПММА + ПЭ она резко возрастает, а в случае ПЭ + ПММА резко падает. Скачок температуры твердой среды можно объяснить следующим образом: так как сублимация, будучи эндотермической реакцией, приводит к понижению температуры и при этом сублимация ПММА развивается быстрее, чем ПЭ, то на границе раздела этих полимеров активная газификация ПММА начинается раньше и температура в этой части оказывается ниже.

На рис. 3 показаны температура газа на выходе из газификатора и отношение массового расхода продуктов газификации к массовому расходу входящего газа в зависимости от вре-

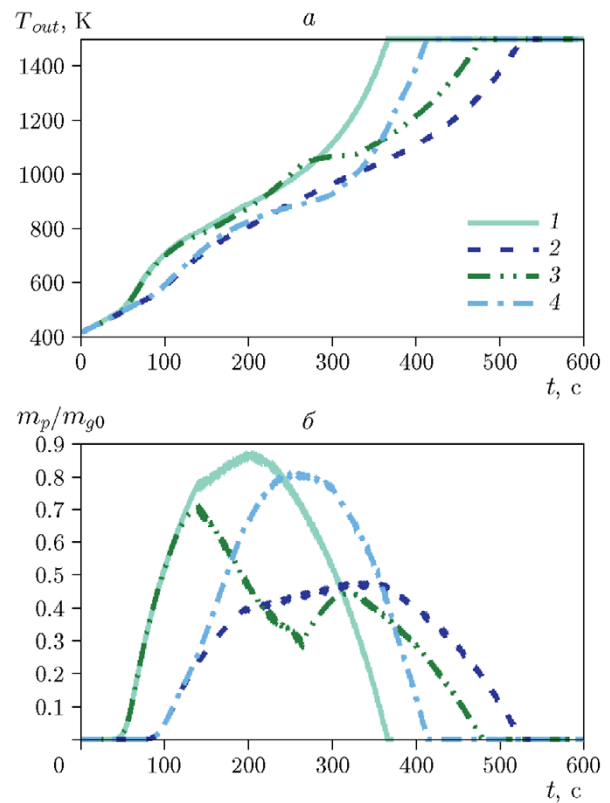


Рис. 3. Температура газа на выходе из газификатора (а) и отношение массового расхода продуктов газификации к массовому расходу входящего газа (б) для ПММА (1), ПЭ (2), ПММА + ПЭ (3), ПЭ + ПММА (4)

мени для рассматриваемых двухслойных горючих, а также для чистых ПЭ и ПММА. Заметим, что рис. 3, а позволяет оценивать предельное время работы низкотемпературного газогенератора: задавая критическое значение температуры газа на выходе из газификатора, необходимое для функционирования системы охлаждения, по рисунку можно определить время достижения данной температуры. Из рис. 3, а следует, что время работы газогенератора на двухслойном горючем зависит от взаимного расположения слоев, причем зависит неоднозначно. При некоторых критических значениях температуры выходящих газов (примерно до 1110 К) дольше работает газификатор ПЭ + ПММА, а при других ее критических значениях (примерно от 1110 К и выше) дольше работает газификатор ПММА + ПЭ. Это объясняется разной зависимостью общей степени газификации двухслойных горючих ПММА + ПЭ и ПЭ + ПММА от времени. Как указано выше, в начальный период процесса общая степень газификации ПЭ + ПММА ниже, чем ПММА +

ПЭ, поэтому такой газификатор будет работать дольше при низком критическом значении температуры. Однако через некоторое время после начала процесса общая степень газификации ПММА + ПЭ становится меньше, чем у ПЭ + ПММА, поэтому время работы данного газификатора при высоком критическом значении температуры оказывается больше.

Следует заметить, что время работы газогенератора при использовании двухслойного горючего, состоящего из ПЭ и ПММА, не находится в диапазоне между временами работы газогенератора отдельно на ПММА и отдельно на ПЭ. На рис. 3,а кривая температуры выходящего газа в случае ПЭ + ПММА пересекает аналогичную кривую для чистого ПЭ. Это можно объяснить возникновением второй волны газификации в случае ПЭ + ПММА, о которой говорилось выше и которая наглядно видна на рис. 1,а. Действительно, при одновременной газификации в двух местах увеличивается отток тепла от горячего газа, и к выходу из газификатора газ приходит более холодным, поэтому температура выходящего газа становится ниже, чем при газификации чистого ПЭ. Однако повышенный отток тепла при газификации ПЭ + ПММА длится недолго, и через некоторое время температура выходящего газа становится выше, чем при газификации чистого ПЭ. Также из рис. 3,а следует, что кривая температуры выходящего газа в случае ПММА + ПЭ пересекает аналогичную кривую для чистого ПММА. Это можно объяснить задержкой во времени газификации во втором слое газификатора с ПММА + ПЭ, которая наглядно видна на рис. 1,а. Когда волна газификации подходит ко второму слою — ПЭ, то газификация в нем начинается не сразу, а с задержкой, и поэтому отток тепла от горячего газа уменьшается, газ приходит к выходу из газификатора более горячим, и в результате температура выходящего газа оказывается выше, чем при газификации чистого ПММА. Однако понижение оттока тепла при газификации ПММА + ПЭ длится недолго, и через некоторое время температура выходящего газа становится ниже, чем при газификации чистого ПММА.

Из рис. 3,б видно, что при газификации системы ПММА + ПЭ процесс на начальном этапе совпадает со случаем чистого ПММА, а при использовании ПЭ + ПММА совпадает со случаем чистого ПЭ. Следует также заметить, что при газификации состава ПММА + ПЭ наблю-

даются два локальных максимума на профиле относительного массового расхода продуктов газификации. Это можно объяснить задержкой во времени газификации во втором слое газификатора, которая наглядно видна на рис. 1,а: когда волна газификации подходит ко второму слою, состоящему из ПЭ, газификация ПММА затухает, а газификация ПЭ еще не развивается, из-за чего массовый расход продуктов газификации снижается. Однако с течением времени ПЭ начинает активно газифицироваться, массовый расход продуктов газификации возрастает и появляется второй локальный максимум.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанных математической модели и численного метода, реализованного в виде решателя для пакета OpenFOAM, изучена газификация двухслойного твердого пористого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора. В ходе вычислительных экспериментов исследовано влияние двухслойности твердого горючего на процесс его газификации на примере газификаторов, содержащих горючее из ПЭ и ПММА с различным взаимным расположением слоев. Показано, что в двухслойном горючем ПЭ + ПММА могут распространяться одновременно две волны газификации, вследствие чего профиль относительного массового расхода продуктов газификации может иметь два локальных максимума. Время работы газогенератора на двухслойном горючем зависит от взаимного расположения слоев, причем зависит неоднозначно: при низкой критической температуре выходящих газов дольше работает газификатор с горючим ПЭ + ПММА, а при высоких ее значениях дольше работает газификатор с ПММА + ПЭ. Кроме того, время работы газогенератора при использовании двухслойного горючего, состоящего из ПЭ и ПММА может выходить из диапазона времени работы газификатора на отдельных горючих: может быть меньше, чем время работы газогенератора на чистом ПММА, и быть больше, чем время работы на чистом ПЭ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Srinivasan R., Raghunandan B. N. Experiments on thermal response of low aspect ratio packed beds at high Reynolds numbers with

- varying inflow temperature // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 2012. — V. 44. — P. 323–333. — DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.07.004.
2. **Karpov A. I., Leschev A. Y., Lipanov A. M., Leschev G. A.** Production of fire extinguishing mixture by solid propellant propulsion // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2013. — V. 26. — P. 338–343. — DOI: 10.1016/j.jlp.2011.10.007.
3. **Krishnan S., Rajesh K. K.** Experimental investigation of erosive burning of composite propellants under supersonic crossflows // *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.* — 2002. — V. 5, N 1-6. — P. 316–329. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v5.i1-6.340.
4. **Osherov A., Natan B., Gany A.** Analytical modelling of the gas generator frequency response in hybrid rocket boosters // *Acta Astronaut.* — 1986. — V. 39, N 8. — P. 589–598. — DOI: 10.1016/S0094-5765(97)00007-6.
5. **Yang S., He G. Q., Liu Y., Li J.** Turbocharged solid propellant ramjet for tactical missile // *Appl. Mech. Mater.* — 2012. — V. 152-154. — P. 204–209. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.152-154.204.
6. **Hong M.** Experimental correction of combustion gas properties of AN-based composite solid propellants used for turbo-pump starter // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2012. — V. 16. — P. 56–60. — DOI: 10.1016/j.ast.2011.03.001.
7. **Кириллов В. В., Ваулин С. Д.** Влияние скорости разложения охладителя на изменение температуры в камере охлаждения низкотемпературного газогенератора // *Хим. физика и мезоскопия.* — 2014. — Т. 16, № 1. — С. 60–62.
8. **Kim A., Crampton G.** Explosion suppression with hybrid gas generator system // *Prog. Saf. Sci. Technol.* — 2008. — V. 7. — P. 891–895.
9. **Шандаков В. А., Жарков А. С., Стрельников В. Н., Пилюгин Л. А., Савельева Е. В.** Физико-химические основы создания элементов снаряжения низкотемпературных газогенераторов различного назначения. — М.: Физматлит, 2011.
10. **Калинин С. В., Шабунин А. И., Сарабьев В. И., Валяев В. А., Хрисанфов М. В., Егорова А. С.** Исследование термодинамических характеристик пиротехнических газогенерирующих составов для низкотемпературных газогенераторов // *Вест. Технол. ун-та.* — 2017. — Т. 20, № 2. — С. 44–46.
11. **Аверьков И. С., Разносчиков В. В., Яновский Л. С.** Параметрический анализ влияния свойств топлива на летно-технические характеристики летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем // *Изв. РАН.* — 2018. — Т. 104, № 4. — С. 117–125.
12. **Кириллов В. В.** Моделирование режимов работы низкотемпературного газогенератора // *Вест. ЮУрГУ. Сер. Машиностроение.* — 2015. — Т. 15, № 3. — С. 5–17.
13. **Salgansky E. A., Lutsenko N. A.** Effect of solid fuel characteristics on operating conditions of low-temperature gas generator for high-speed flying vehicle // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2021. — V. 109. — 106420. — DOI: 10.1016/j.ast.2020.106420.
14. **Федорычев А. В., Милёхин Ю. М.** Модель горения смесового твердого топлива с испаряющимся охладителем // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 3. — С. 117–127. — DOI: 10.15372/FGV20220312.
15. **Салганский Е. А., Луценко Н. А., Яновский Л. С.** Моделирование газификации твердого пористого энергетического материала в низкотемпературном газогенераторе летательного аппарата // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 3. — С. 64–70. — DOI: 10.15372/FGV20220306.
16. **Кириллов В. В.** О влиянии конструктивных и режимных параметров на тепло- и массообмен в низкотемпературном газогенераторе // *Хим. физика и мезоскопия.* — 2015. — Т. 17, № 2. — С. 227–238.
17. **Левин В. А., Луценко Н. А., Салганский Е. А., Яновский Л. С.** Модель газификации твердого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора летательного аппарата // *Докл. АН.* — 2018. — Т. 482, № 2. — С. 150–154. — DOI: 10.31857/S086956520003162-1.
18. **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 // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2019. — V. 84. — P. 31–36. — DOI: 10.1016/j.ast.2018.10.029.
19. **Волкова Н. Н., Дашко Д. В., Жолудев А. Ф., Казаков А. И., Кислов М. Б., Набатова А. В., Яновский Л. С.** Закономерности горения и термического разложения твердых газогенерирующих композиций на основе высокоэнтальпийных полиядерных N-гетероциклических соединений и поли-2-метил-5-винилтетразола // *Физика горения и взрыва.* — 2022. — Т. 58, № 4. — С. 5–15. — DOI: 10.15372/FGV20220401.
20. **Салганский Е. А., Зайченко А. Ю., Подлесный Д. Н., Салганская М. В., Цветков М. В., Цветкова Ю. Ю.** Экспериментальное исследование газификации уротропина при различных температурах газообразного теплоносителя // *Хим. физика.* — 2022. — Т. 41, № 11. — С. 39–43. — DOI: 10.31857/S0207401X22110097.
21. **Shiptyuk A. N., Zvegintsev V. I., Frolov S. M., Vnuchkov D. A., Kiseleva T. A., Kislovsky V. A., Lukashevich S. V., Melnikov A. Yu., Nalivaychenko D. G.** Gasification of low-melting hydrocarbon

- material in the airflow heated by hydrogen combustion // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2020. — V. 45, N 15. — P. 9098–9112. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.099.
22. **Sivapirakasam S. P., Jeyabalaganesh G., Venu Kumar N., Aravind S. L., Aravind G.** Простой метод оценки баллистических свойств газогенерирующих составов // *Физика горения и взрыва*. — 2021. — Т. 57, № 3. — С. 49–57. — DOI: 10.15372/FGV20210304.
23. **Vnuchkov D. A., Zvegintsev V. I., Nalivaichenko D. G., Frolov S. M.** Measurement of gas flow rate at gasification of low-melting materials in a flow-through gas generator // *Energies*. — 2022. — V. 15, N 15. — 5741. — DOI: 10.3390/en15155741.
24. **Порязов В. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Архипов В. А.** Численное моделирование горения смесового твердого топлива, содержащего порошок бора // *Физика горения и взрыва*. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 78–87. — DOI: 10.15372/FGV20220209.
25. **Fierro M., Gutierrez C., Jovicic V., Toledo M.** Hollow spheres as inert packed bed from lean to rich combustion in porous media // *Int. J. Heat Mass Transfer*. — 2022. — V. 195. — 123067. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123067.
26. **Ma X. H., Hu J., Li Q. G., Li P., Liu X., Yan X.-M., Cheng Ch.-Sh., Li S.-X.** Apparent synthesis reaction kinetics and decomposition reaction mechanism of [(5,6-dimethyl dicarboxylate-3-pyridine) methyl]-trimethylammonium bromide // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2022. — V. 147. — P. 11467–11475. — DOI: 10.1007/s10973-022-11569-0.
27. **Feng K., Hu Y., Cao T.** Effect of K-decoration on the generation and reduction of  $N_2O$  onto a biochar surface // *Fuel*. — 2022. — V. 316. — 123148. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123148.
28. **Fierro M., Gutierrez C., Bubnovich V., Ripoll N., Toledo M.** Thermal effect of hollow spheres in a filtration combustion process // *Appl. Therm. Eng.* — 2021. — V. 195. — 117037. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117037.
29. **Manelis G. B., Glazov S. V., Salgan-sky E. A., Lempert D. B., Gudkova I. Yu., Domashnev I. A., Kolesnikova A. M., Kislov V. M., Kolesnikova Yu. Yu.** Extraction of molybdenum-containing species from heavy oil residues using the filtration combustion method // *Int. J. Heat Mass Transfer*. — 2016. — V. 92. — P. 744–750. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.056.
30. **Тереза А. М., Агафонов Г. Л., Бетев А. С., Медведев С. П.** Редуцирование детального кинетического механизма для эффективного моделирования задержек воспламенения смесей метана и ацетилена с кислородом // *Хим. физика*. — 2020. — Т. 39, № 12. — С. 29–36. — DOI: 10.31857/S0207401X20120158.
31. **Сабденков К. О.** Влияние изменения молярной массы на температуру пламени и скорость горения // *Физика горения и взрыва*. — 2021. — Т. 57, № 1. — С. 51–57. — DOI: 10.15372/FGV20210105.
32. **Tereza A. M., Medvedev S. P., Smirnov V. N.** Chemiluminescence of electronically excited species during the self-ignition of acetylene behind reflected shock waves // *Acta Astronaut.* — 2021. — V. 181. — P. 612–619. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.09.048.
33. **Нигматулин Р. И.** Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978.
34. **Левин В. А., Луценко Н. А.** Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // *Инж.-физ. журн.* — 2006. — Т. 79, № 1. — С. 35–40.
35. **Poling B. E., Prausnitz J. M., O'Connell J. P.** *The Properties of Gases and Liquids*. — 5th ed. — New-York: McGraw-Hill, 2001.
36. **Vovelle Ch., Delfau J.-L., Reuillon M., Bransier J., Laraqui N.** Experimental and numerical study of the thermal degradation of PMMA // *Combust. Sci. Technol.* — 1987. — V. 53, N 2-3. — P. 187–201. — DOI: 10.1080/00102208708947026.
37. **Westerhout R. W. J., Balk R. H. P., Meijer R., Kuipers J. A. M., van Swaaij W. P. M.** Examination and evaluation of the use of screen heaters for the measurement of the high temperature pyrolysis kinetics of polyethylene and polypropene // *Ind. Eng. Chem. Res.* — 1997. — V. 36, N 8. — P. 3360–3368. — DOI: 10.1021/ie960502e.
38. **Stoliarov S. I., Walters R. N.** Determination of the heats of gasification of polymers using differential scanning calorimetry // *Polym. Degrad. Stab.* — 2008. — V. 93, N 2. — P. 422–427. — DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.022.
39. **Pizzo Y., Lallemand Ch., Kacem A., Kaiss A., Gerardin J., Acem Z., Boulet P., Porterie B.** Steady and transient pyrolysis of thick clear PMMA slabs // *Combust. Flame*. — 2015. — V. 162, N 1. — P. 226–236. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.07.004.
40. **Xie Q., Chen H., Yang Y., Ding Y., Yuan Y.** Thermal kinetic parameter analysis by series of thermogravimetry experiments with varied sample mass for scale-up applications // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2022. — V. 147. — P. 9737–9746. — DOI: 10.1007/s10973-022-11232-8.

Поступила в редакцию 29.11.2022.  
Принята к публикации 14.12.2022.