

УДК 621.452

## **Исследование газификации твердых углеводородов в шаровых укладках при воздействии высокотемпературного газового потока**

**К.Ю. Арефьев<sup>1,2,3</sup>, К.В. Федотова<sup>1,2</sup>, Л.С. Яновский<sup>1,4</sup>, М.А. Ильченко<sup>1</sup>,  
К.Т. Ниязбаев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова, Москва*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана*

<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Моск. обл.*

<sup>4</sup>*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Моск. обл.*

E-mail: fedkv\_89@mail.ru

Представлены математическая модель и результаты расчетов процесса газификации твердых углеводородов (ТУВ) в шаровых укладках при их обдуве высокотемпературным газом внутри каналов переменного сечения. Проведено параметрическое исследование влияния температуры и состава газовой фазы, теплофизических свойств ТУВ, диаметра шаровой укладки и конфигурации канала на массовый расход и температуру продуктов газификации ТУВ. Представлен метод оценки параметров процесса газификации ТУВ в проточном тракте низкотемпературных газогенераторов (НТГГ) без потери формы элементов шаровых укладок вследствие их плавления. Разработаны рекомендации, позволяющие обеспечить требуемые величины массового расхода ТУВ и температуры в выходном сечении НТГГ. Полученные данные могут быть использованы при анализе экспериментальных исследований сублимации ТУВ и на этапе предварительного проектирования НТГГ.

**Ключевые слова:** твердые углеводороды, математическое моделирование, двухкамерный низкотемпературный газогенератор, сублимация, азины.

### **Введение**

Актуальным направлением развития энергетических и силовых установок является создание автономных газогенераторов, обеспечивающих возможность генерации низкотемпературных потоков газа с высоким содержанием газифицированных углеводородных соединений. Требования компактности и технологичности таких низкотемпературных газогенераторов (НТГГ) приводят к необходимости организации хранения углеводородов в твердой фазе.

Использование однокамерных газогенераторов и существующих энергетических конденсированных систем (ЭКС) не позволяет получать продукты сгорания с температурой менее 1500 К [1]. Некоторое снижение температуры может быть достигнуто путем

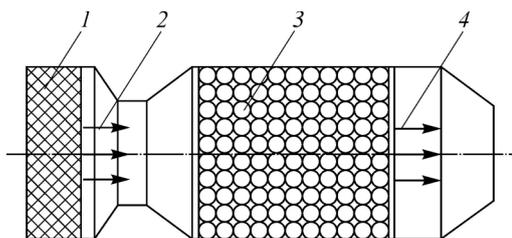


Рис. 1. Схема двухкамерного НТГГ.

1 — активное вещество,  
2 — высокотемпературный поток, 3 — ТУВ,  
4 — низкотемпературные продукты газификации.

оптимизации рецептуры ЭКС и использования специальных модификаторов горения [2]. Однако снижение температуры до значений менее 1100 К связано с трудностями обеспечения стабильного горения и полной газификации ЭКС [1].

Снижение температуры газов на выходе из НТГГ до значений 750–800 К может быть реализовано в двухкамерном НТГГ [1, 3], схема которого с последовательным размещением активного вещества 1 и твердого углеводорода (ТУВ) 3 приведена на рис. 1. При разложении (горении) активного вещества в первой камере создаются высокотемпературные продукты сгорания 2 (с температурой более 2000 К), поток которых омывает поверхность ТУВ. Отметим, что ТУВ не способен к самостоятельному горению. При контакте с высокотемпературными продуктами сгорания ТУВ газифицируется и подвергается частичной деструкции, вследствие чего поток газа обогащается углеводородными соединениями, а его температура снижается.

Известные двухкамерные НТГГ были разработаны для устройств наддува различных емкостей и систем управления [4]. Принцип их действия заключался в том, что продукты сгорания порохового аккумулятора давления пропускались через специальные охлаждающие укладки, в результате чего температура могла быть снижена до значений примерно 1000 К. В работах [5, 6] анализ формы и размеров химических охладителей для НТГГ показал, что наиболее эффективно их применение в виде шаровых укладок [6]. В этом случае обеспечивается удовлетворительное соотношение площади поверхности и гидродинамического сопротивления.

При создании двухкамерных газогенераторов актуальными являются выбор режима работы, состава активного вещества, теплофизических свойств ТУВ, диаметра шаровой укладки и конфигурации проточного тракта, которые обеспечивают получение необходимых величин массового расхода и температуры продуктов газификации ТУВ в течение всего времени работы газогенератора. Для разработки рекомендаций, позволяющих достичь необходимых величин массового расхода ТУВ и температуры в выходном сечении НТГГ, а также для минимизации потери формы шаровых элементов укладок вследствие их плавления требуется провести расчетные параметрические исследования.

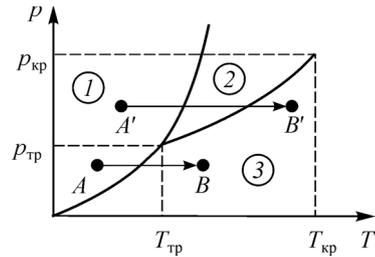
Настоящая статья посвящена математическому моделированию процесса газификации ТУВ в проточном тракте двухкамерного НТГГ. Целью работы является разработка метода выбора режимов газификации ТУВ, обеспечивающих минимальную потерю формы шаровых элементов укладок вследствие их плавления; исследование влияния типа используемого активного вещества на состав и рабочие параметры продуктов газификации (температуру, массовый расход); проведение параметрических расчетов для определения характеристик НТГГ в зависимости от его геометрических параметров, а также размеров элементов шаровой укладки ТУВ.

### Режимы газификации углеводородов

Для обеспечения эффективного применения ТУВ в качестве хладагента и источника горючих газов в двухкамерных НТГГ необходимо выполнение следующих основных требований [3, 7, 8]:

- температура газификации ТУВ не превышает 750 К;
- отсутствие конденсированной фазы в продуктах термодеструкции;
- плотность ТУВ не менее 1000 кг/м<sup>3</sup>;

Рис. 2. Фазовая диаграмма состояния вещества.  
Твердая (1), жидкая (2) и газовая (3) фазы.



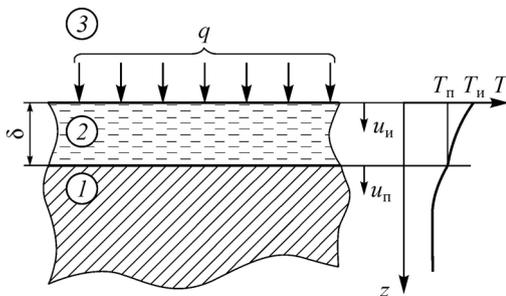
— наличие минимального окислительного потенциала продуктов газификации.

В природе существует большое количество соединений, термолит (диссоциация, сублимация, деградация) которых сопровождается поглощением тепла. Вышеприведенным требованиям удовлетворяют такие ТУВ, как полиэтилен, полиизобутилен, уротропин, алканы и их композиции [9]. В качестве активного вещества возможно использование составов на основе бризантных веществ, перхлоратов, а также азотсодержащих соединений [10].

Под действием высокотемпературного потока продуктов сгорания активного вещества газификация ТУВ может проходить посредством прямого и непрямого перехода углеводородов из твердой в газовую фазу в соответствии с фазовой диаграммой состояния вещества, построенной в координатах  $(p$  (давление),  $T$  (температура)), пример которой можно видеть на рис. 2. На диаграмме отмечены характерные значения параметров:  $p_{тр}$ ,  $T_{тр}$  — давление и температура тройной точки;  $p_{кр}$ ,  $T_{кр}$  — критические значения давления и температуры. При прямом переходе (линия  $A-B$ ) реализуется процесс сублимации. Однако для большинства ТУВ прямой переход может быть осуществлен только при низких давлениях (менее 1 кПа), что существенно ограничивает возможность его реализации на практике. Для газогенераторов наиболее подходящими являются изобарические не прямые переходы ( $A'-B'$ ). При этом происходит плавление и последующее испарение вещества. Совокупность этих процессов может быть представлена как интегральный процесс перехода из твердого в газообразное состояние.

Следует отметить, что наличие жидкой фазы негативно сказывается на эффективности процесса газификации. В частности, жидкая фаза способствует потере формы шаровых элементов укладки ТУВ, ее неравномерному перераспределению во второй камере НТГГ за счет текучести и снижению интенсивности газификации с соответствующим изменением параметров потока в выходном сечении.

Рассмотрим процессы фазовых переходов вблизи поверхности элемента ТУВ при воздействии внешнего теплового потока плотностью  $q$  (рис. 3). В общем случае поверхность твердой фазы 1 покрыта жидкой пленкой 2, которая контактирует с газом 3. Характер распределения температуры в жидкой и твердой фазах вдоль координаты  $z$  показан на эюре. Следует отметить, что на поверхности раздела жидкой и газовой фаз реализуется температура испарения  $T_{и}$ , а на поверхности твердой и жидкой — температура плавления  $T_{п}$ . Для оценки интенсивности фазовых переходов введем следующие характерные параметры:  $u_{п}$  — линейная скорость плавления, определяющая скорость движения поверхности раздела твердой и жидкой фаз,  $u_{и}$  — линейная скорость испарения, определяющая скорость движения поверхности раздела жидкой и газовой фаз.



Реализация режима газификации без потери формы элементов укладки ТУВ возможна при выполнении условия

$$u_{и} \geq u_{п}. \quad (1)$$

Рис. 3. Схема процесса газификации и эюра температуры вблизи поверхности ТУВ.

Твердая (1), жидкая (2) и газовая (3) фазы.

Если условие (1) не выполняется в течение длительного времени, то линейная скорость плавления будет превышать линейную скорость испарения, что приведет к потере формы элементов и «стеканию» ТУВ под действием газодинамических и массовых сил.

Для оценки условия существования режима газификации рассмотрим уравнение баланса энергии, в котором плотность теплового потока  $q$  можно представить в виде

$$q = q_{\text{и}} + q_{\text{п}} + q_{\text{н}},$$

где  $q_{\text{и}} = u_{\text{и}} \cdot r \cdot \rho_{\text{ж}}$  и  $q_{\text{п}} = u_{\text{п}} \cdot s \cdot \rho_{\text{т}}$  — плотности тепловых потоков, затрачиваемых соответственно на испарение и на плавление,  $q_{\text{н}}$  — плотность теплового потока, затрачиваемого на нагрев,  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{т}}$  — плотности жидкой и твердой фаз,  $r$ ,  $s$  — удельная теплота испарения и плавления соответственно. Принимая во внимание, что для квазистационарного процесса величина  $q_{\text{н}}$  существенно меньше  $q_{\text{и}}$  и  $q_{\text{п}}$ , этим слагаемым далее будем пренебрегать.

Для линеаризованного распределения температуры в жидкой пленке толщиной  $\delta$  запишем уравнение для величины  $q_{\text{п}}$ :

$$q_{\text{п}} = \lambda_{\text{ж}} \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{п}}) / \delta,$$

здесь  $\lambda_{\text{ж}}$  — коэффициент теплопроводности вещества в жидкой фазе. Тогда величина  $q_{\text{п}}$  определяется как

$$q_{\text{и}} = q - \lambda_{\text{ж}} \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{п}}) / \delta.$$

Линейные скорости плавления и испарения вычисляются по формулам

$$u_{\text{и}} = \frac{q}{\rho_{\text{ж}} \cdot r} - \frac{\lambda_{\text{ж}} \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{п}})}{\rho_{\text{ж}} \cdot r \cdot \delta}, \quad u_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{ж}} \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{п}})}{\rho_{\text{т}} \cdot s \cdot \delta}. \quad (2)$$

Уравнения (2) справедливы при небольших значениях  $\delta$  относительно характерного диаметра шаровых элементов укладки. В противном случае требуется учитывать кривизну поверхности. Для известных зависимостей температуры плавления и температуры испарения от давления значения  $r$  и  $s$  можно определить по эмпирическим формулам для углеводородов [11]:

$$r = [36,63 + 19,13 \cdot \lg(T_{\text{и}})] \cdot T_{\text{и}} / M, \quad s = 4,15 \cdot 10^5 \cdot T_{\text{п}} / \rho,$$

где  $M$  — молярная масса углеводорода. В предельном случае, когда  $u_{\text{и}} = u_{\text{п}}$ , и при малом изменении плотности углеводорода при плавлении, характерную толщину жидкого слоя можно записать в виде

$$\delta = \frac{\lambda_{\text{ж}} \cdot (T_{\text{и}} - T_{\text{п}}) \cdot (s + r)}{s \cdot q}. \quad (3)$$

Для того, чтобы газификация проходила надлежащим образом, толщина жидкого слоя должна быть заметно (в десять и более раз) меньше характерного линейного размера  $l$  элемента ТУВ. При использовании шаровых элементов укладки ТУВ в качестве характерного размера  $l$  можно использовать их радиус. Эксперименты, проведенные в работе [9], качественно подтвердили возможность использования предложенного условия. В табл. 1 записаны характерные расчетные значения параметра  $k_{\delta} = \delta/l$ , где  $\delta$  определялись по уравнению (3). Также здесь приведены экспериментально определенные особенности процесса газификации различных ТУВ.

Отметим, что для заданного химического состава и конфигурации элементов ТУВ наибольшее влияние на процесс газификации оказывает величина теплового потока. При снижении плотности теплового потока величина  $\delta$  будет увеличиваться, и при значениях  $q$  ниже «критического» значения  $q_{\text{кр}}$  газификация будет сопровождаться потерей формы вследствие интенсивного плавления ТУВ. Учитывая, что согласно предварительной

Таблица 1

## Характер газификации углеводородов

Вещество	$k_{\delta}$ (расчет)	Особенность процесса газификации (данные экспериментальной работы [9]).
Полиэтилен ( $C_2H_4$ ) <sub>n</sub>	0,7–1,0	Потеря формы, плавление, термодеструкция расплава практически без испарения.
Полиизобутилен ( $C_4H_8$ ) <sub>n</sub>	0,4–0,8	
Уротропин ( $C_6H_{12}N_4$ )	0,07–0,15	Испарение большей части материала с частичным разложением и с сохранением формы.
Бутадиен-стирольный термoplast	0,01–0,02	Испарение без разложения и с сохранением формы.

расчетной оценке и анализу экспериментальных данных [9] величина  $k_{\delta}$  не должна превышать 0,1, значение  $q_{кр}$  может быть выражено из уравнения (3) как

$$q_{кр} = \frac{\lambda_{ж} \cdot (T_{и} - T_{п}) \cdot (s + r)}{s \cdot l \cdot 0,1}.$$

Таким образом, используя расчетный параметр  $k_{\delta}$ , можно оценить характер газификации твердых углеводородов в НТГГ и выбрать режимы, обеспечивающие отсутствие (минимизацию) потери формы в результате плавления ТУВ.

## Математическая модель

Для оценки эффективности НТГГ и определения его базовой конфигурации, обеспечивающей генерацию газа с заданными температурой и содержанием газообразных углеводородов, требуется проведение большого объема параметрических расчетов. Использование многомерных математических моделей сопряжено со значительными вычислительными и временными затратами. В настоящей работе предложена одномерная математическая модель процесса газификации шаровых элементов укладки ТУВ в канале при обдуве потоком высокотемпературных продуктов сгорания активного вещества.

На рис. 4 представлена расчетная схема двухкамерного НТГГ, в котором активное вещество и шаровая укладка ТУВ расположены последовательно. Высокотемпературные продукты сгорания 2 активного вещества 1 по цилиндрическому каналу с диаметром  $D_{гг,н}$  поступают к входному сечению конического участка камеры НТГГ, где расположена регулярная гексаэдрическая укладка шаровых элементов ТУВ с диаметром  $D_{ш}$ . В зависимости от требуемых параметров низкотемпературного потока продуктов генерации 4 и угла конусности  $\alpha$  участка НТГГ определяются длина  $L_{гг}$  и диаметр выходного сечения  $D_{гг,к}$  НТГГ. При угле конусности  $\alpha = 0^\circ$  НТГГ имеет цилиндрический вид, что является базовым вариантом в рассматриваемой задаче.

В случае охлаждения потока газа 2 вследствие газификации ТУВ температура в выходном сечении будет ограничена снизу температурой испарения. В работе исследуется процесс газификации ТУВ на основе полиэтилена. Отметим, что в общем случае теплофизические характеристики такого ТУВ зависят от степени полимеризации и других условий. Для обобщения результатов моделирования в работе приняты усредненные значения характеристик

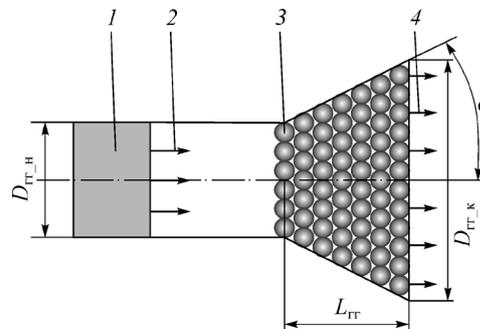


Рис. 4. Схема двухкамерного НТГГ.

- 1 — активное вещество, 2 — высокотемпературные продукты сгорания активного вещества,  
3 — шаровые элементы укладки,  
4 — низкотемпературные продукты газогенерации.

Таблица 2

Характеристики ТУВ

Характеристика	Значение
Температура испарения $T_{ис}$ , К (при давлении 5 МПа)	750
Эквивалентная теплота испарения $r_{эки}$ , кДж/кг	350
Энтальпия образования, кДж/кг	-1094,7

рассматриваемых ТУВ [12], представленные в табл. 2. Здесь эквивалентная теплота испарения является суммарной энергией, необходимой для нагрева и фазовых переходов ТУВ.

В математической модели принято, что выполняется условие (1), шаровая укладка ТУВ прогрета равномерно, давление  $p_{гг}$  в НТГГ постоянно. Скорость потока продуктов сгорания активного вещества и его смеси с продуктами газификации ТУВ не превышает 20 м/с, а число Маха потока  $M \leq 0,05$ , поэтому газ рассматривается как несжимаемый.

В качестве активных веществ в работе рассматриваются октоген, перхлорат аммония (ПХА), триазин, подогретый азот. Условная химическая формула указанных веществ, их энтальпия и характерная температура сгорания представлены в табл. 3. Энтальпия активного вещества  $I_{акт}$  определяется по формуле:

$$I_{акт} = (\Delta H_{f,298}^{\circ})_{акт} + \int_{298}^{T_{нагр}} C_{p\_акт}(T) dT,$$

где  $(\Delta H_{f,298}^{\circ})_{акт}$  — стандартная энтальпия образования активного вещества,  $C_{p\_акт}(T)$  — зависимость удельной теплоемкости активного вещества от температуры,  $T_{нагр}$  — температура, до которой нагрето активное вещество.

Температура и теплофизические свойства высокотемпературного потока продуктов сгорания активного вещества определяются по результатам термодинамического расчета с помощью программного комплекса TERRA [13] для заданных значений давления и энтальпии. При насыщении газового потока продуктов сгорания активного вещества продуктами газификации испаряющегося ТУВ изменяются его температура  $T_{г}$ , динамическая вязкость  $\mu$ , удельная теплоемкость  $C_p$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и плотность  $\rho$ . Расчет вышеприведенных параметров газового потока проводится в программном комплексе TERRA, позволяющим моделировать предельно равновесные состояния сложных систем. В качестве исходных данных задаются два параметра равновесия — давление в НТГГ  $p_{гг}$  и энтальпия смеси  $I_{см}$ , а также массовое содержание активного вещества и продуктов газификации ТУВ в газовой смеси.

Энтальпия смеси определяется из свойств аддитивности:

$$I_{см} = I_{УВ} \cdot \frac{1}{1 + K_m} + I_{акт} \cdot \frac{K_m}{1 + K_m},$$

где  $I_{УВ}$  — энтальпия ТУВ,  $K_m$  — соотношение расходов активного вещества и продуктов газификации ТУВ. На каждом шаге по осевой координате и по времени проводится расчет

Таблица 3

Характеристики активных веществ

Характеристика	Активное вещество			
	Октоген	ПХА	Триазин	Азот (подогретый)
Условная химическая формула	$C_4H_8N_8O_8$	$NH_4ClO_4$	$C_3N_{12}$	$N_2$
Энтальпия, кДж/кг	+250	-2520	+6276	+2313
Температура разложения, К	3200	3150	3150	2000

массового расхода с поверхности шаровой укладки  $G_{\text{УВ}}$ , с помощью которого, а также зная массовый расход активного вещества  $G_{\text{акт}}$ , можно определить  $K_m$ :  $K_m = G_{\text{акт}}/G_{\text{УВ}}$ . Суммарный массовый расход при этом составляет  $G_r = G_{\text{акт}} + G_{\text{УВ}}$ .

Согласно работе [6], процесс нагрева и газификации шаровых элементов ТУВ в проточном тракте НТГГ осуществляется преимущественно за счет конвективного теплообмена с высокотемпературным газовым потоком. Уравнение теплового баланса для одного шарового элемента ТУВ записывается следующим образом:

$$\frac{dD_{\text{ш}}}{dt} = -\frac{2 \cdot q_k}{r \cdot \rho_r}, \quad (4)$$

где  $q_k$  — плотность конвективного теплового потока,  $t$  — время.

В связи с тем, что теплофизические свойства обдувающего газового потока зависят от времени и диаметра шаровых элементов ТУВ, решение уравнения (4) осуществляется с использованием дискретизации параметров по времени (с шагом  $\Delta t$  и индексом  $j$ ) и по рядам укладки (индекс  $i$ ) с последующим интегрированием явным методом. В качестве начальных условий заданы диаметр  $D_{\text{ш},0}$  и температура  $T_{\text{ш},0}$  шаровых элементов ТУВ. Граничными условиями являются значения давления, температуры и массового расхода потока продуктов сгорания активного вещества на входе в расчетную область. На выходе из расчетной области задается давление. Стенки НТГГ приняты адиабатическими.

Массовый расход с одного ряда элементов шаровой укладки определяется следующим образом:

$$G_{\text{УВ},i,j} = \frac{\pi \cdot \rho_{\text{ТУВ}} \cdot (D_{\text{ш},i,j}^3 - D_{\text{ш},i,j+1}^3)}{6 \cdot \Delta t} \cdot N_{\text{ш},i,j},$$

где  $\rho_{\text{УВ}}$  — плотность ТУВ,  $N_{\text{ш}}$  — количество элементов шаровой укладки в одном ряду.

Плотность конвективного теплового потока в каждом ряду шаровой укладки в различные моменты времени определяется по формуле  $q_k = \alpha \cdot (T_r - T_{\text{ш}})$ , где  $T_r$  — температура обдувающего газового потока, переменная по времени и длине канала,  $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda / D_{\text{ш}}$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Nu}$  — число Нуссельта.

Для выбранного типа шаровой укладки с учетом интенсивности газификации число Нуссельта на основании данных, приведенных в работе [6], определяется как

$$\text{Nu} = k_{\text{суб}} \cdot (2 + 0,6 \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \text{Re}^{0,45}),$$

где  $k_{\text{суб}} = 0,5 \div 0,7$  — коэффициент, учитывающий влияние испарения ТУВ на конвективный тепловой поток [14]. Числа Прандтля  $\text{Pr}$  и Рейнольдса  $\text{Re}$  определяются зависимостями  $\text{Pr} = \mu \cdot C_p / \lambda$ ,  $\text{Re} = W \cdot D_{\text{ш}} \cdot \rho_r / \mu$ , где  $W = G_r / (F_{\text{своб}} \cdot \rho_r)$  — скорость обдувающего газового потока,  $F_{\text{своб}}$  — площадь свободного проходного сечения. Плотность газового потока определяется из уравнения состояния  $\rho_r = p_{\text{г}} / (R \cdot T_r)$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная обдувающего потока.

Разработанная математическая модель позволяет проводить оценку массового расхода ТУВ, а также определять температуру на выходе из НТГГ при заданных геометрических ( $D_{\text{г-нр}}$ ,  $\alpha$ ,  $D_{\text{ш}}$ ) и режимных ( $p_{\text{г}}$ ,  $G_{\text{акт}}$ ) параметрах. Результаты могут быть использованы на этапе предварительного проектирования при проведении параметрических расчетов.

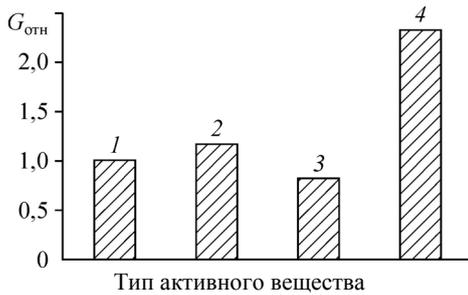


Рис. 5. Диаграмма относительных массовых расходов активного вещества.

1 — октоген, 2 — ПХА, 3 — триазин, 4 — азот.

### Выбор активного вещества

Сравнение различных типов активного вещества, а именно: продуктов сгорания октогена, ПХА, триазина и газообразного азота

проводилось при давлении в НТГГ  $p_{гг} = 5$  МПа для диаметра элементов шаровой укладки  $D_{ш} = 0,01$  м и угла конусности  $\alpha = 5^\circ$ .

В качестве параметра сравнительного анализа рассматривалось такое соотношение расходов  $K_m$ , при котором для заданных условий достигалась температура продуктов газогенерации в выходном сечении, равная  $T = 750$  К. При этом массовый расход ТУВ принимался постоянным, а массовый расход активного вещества определялся из условия получения заданной температуры в выходном сечении.

На рис. 5 представлена диаграмма относительных массовых расходов активного вещества  $G_{отн}$ , необходимых для газификации одного и того же количества ТУВ. При этом относительный массовый расход определялся как отношение массового расхода рассматриваемого активного вещества к массовому расходу октогена.

В качестве второго параметра сравнительного анализа следует рассматривать наибольшее по массе количество углеводородных соединений в продуктах газогенерации, способных к дальнейшим химическим превращениям с выделением тепла в окислительной среде. В табл. 4 приведены массовые доли основных соединений, входящих в состав генераторного газа, при заданных условиях, соответствующих относительным массовым расходам (см. рис. 5).

Анализ показал, что наиболее перспективными активными веществами являются октоген и триазин, поскольку они дают наибольшее количество углеводородных соединений в генераторном газе, а для газификации требуется минимальное количество самого активного вещества. В дальнейших расчетах в качестве активного вещества рассматривался триазин.

### Результаты параметрических расчетов

Исследование влияния геометрических и режимных параметров на эффективность процесса газификации ТУВ в двухкамерном НТГГ проводилось для времен работы  $t_1 = 20$  с,  $t_2 = 100$  с и  $t_3 = 500$  с, для углов конусности  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 5^\circ$ ,  $\alpha_3 = 10^\circ$ ,  $\alpha_4 = 15^\circ$  и  $\alpha_5 = 30^\circ$  ( $\alpha_1 = 0$  соответствует цилиндрическому НТГГ), для давлений  $p_{гг1} = 1$  МПа,  $p_{гг2} = 3$  МПа и  $p_{гг3} = 5$  МПа и отношений диаметров шаровых элементов укладки к характерному диаметру НТГГ  $D_{отн1} = 0,0125$ ,  $D_{отн2} = 0,025$  и  $D_{отн3} = 0,0375$ . Результаты

Таблица 4

#### Химический состав продуктов газификации

Смесь	Массовая доля вещества						
	$C_5H_{10}$	$C_6H_{12}$	$C_2H_2$	$CH_4$	CO	$N_2$	HCl
Октоген + ТУВ	0,453	0,186	—	0,072	0,151	—	—
ПХА + ТУВ	0,376	0,153	—	0,117	0,212	—	0,069
Триазин + ТУВ	0,429	0,192	0,115	—	—	0,247	—
Азот + ТУВ	0,442	0,197	—	—	—	0,34	—

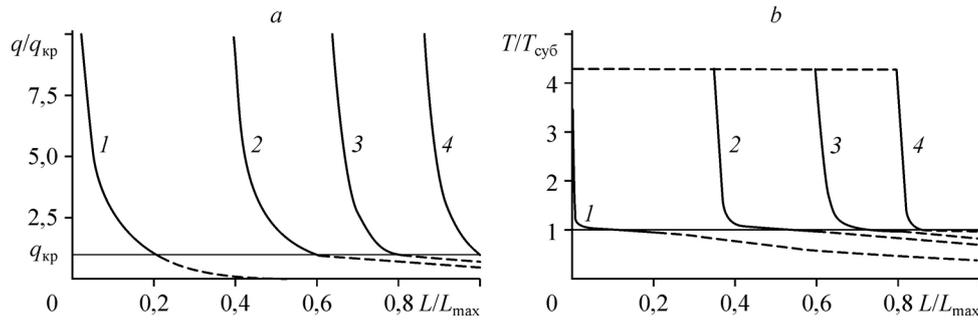


Рис. 6. Распределения плотности тепловых потоков (а) и температуры газа (б) вдоль осевой координаты в различные моменты времени.

$t/t_{\max} = 0$  (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 0,75 (4).

расчетов представлены на рис. 6, где приведены распределения плотности теплового потока и температуры газа в различные моменты времени. Отметим, что в рассматриваемом газогенераторе возможен случай, когда тепловые потоки на часть рядов шаровых элементов ТУВ могут оказаться меньше «критических». Величины «критических» тепловых потоков для указанных размеров шаровых элементов укладки составляют соответственно  $q_{\text{кр}1} = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ ,  $q_{\text{кр}2} = 0,9 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ ,  $q_{\text{кр}3} = 0,6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ . Плотность теплового потока, действующего на первые ряды шаровой укладки, более чем в 15 раз превышает критическое значение (рис. 6а). Такое распределение плотности тепловых потоков обусловлено тем, что во второй камере НТГГ газ охлаждается по мере движения, и начиная с определенного момента (штриховые линии на рис. 6б) его температуры оказывается недостаточно, чтобы газифицировать ТУВ. Элементы ТУВ при воздействии газа с такой температурой могут быть подвержены плавлению, что негативно отразится на эффективности НТГГ. Наиболее подверженными плавлению являются шаровые элементы в последнем ряду. В этой связи при выборе конфигурации и времени работы НТГГ требуется выполнять проверку на отсутствие плавления последнего ряда шаровых элементов по следующему условию:

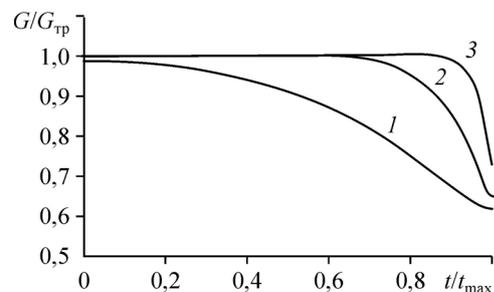
$$\pi \cdot D_{\text{ш}}^2 \cdot \int_0^{t_{\text{кр}}} q_{\text{к}} dt < \frac{\pi \cdot D_{\text{ш}}^3}{6} \cdot \rho \cdot \left( s + \int_{T_0}^{T_{\text{п}}} C_p \cdot dT \right), \quad (5)$$

здесь  $t_{\text{кр}}$  — время воздействия теплового потока с плотностью ниже «критического» значения на последний ряд шаровых элементов. В случае невыполнения условия (5) требуется внедрение специальных химмотологических и технических решений, обеспечивающих минимизацию плавления ТУВ, которые в настоящей работе не рассматриваются.

На рис. 7 приведены графики изменения массового расхода на выходе из НТГГ во времени. Массовый расход представлен в безразмерном виде как отношение текущего массового расхода  $G$  к его требуемому значению  $G_{\text{тр}}$ . Безразмерное время представляет собой отношение текущего времени  $t$  к максимальному  $t_{\max}$  для рассматриваемого случая. В общем случае выбор времени работы НТГГ

Рис. 7. Изменение величины массового расхода на выходе из НТГГ по времени при различных временах работы.

$t_{\max} = 20$  (1), 100 (2), 500 (3) с.



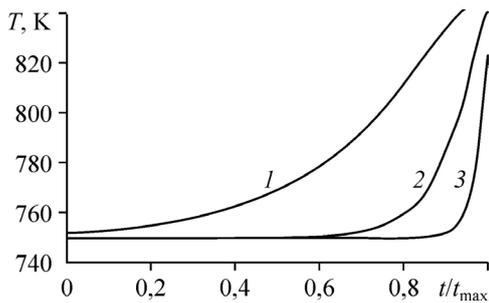


Рис. 8. Изменение температуры продуктов газогенерации в выходном сечении НТГГ.

$t_{\max} = 20$  (1), 100 (2), 500 (3) с.

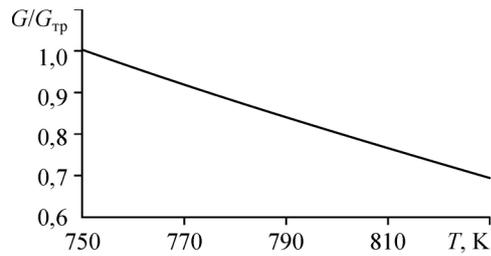


Рис. 9. Взаимосвязь  $G/G_{\text{тр}}$  и температуры продуктов газификации в выходном сечении НТГГ.

зависит от большого количества факторов, а полученные данные характеризуют возможность обеспечения постоянства параметров в течение времени его работы. Как видно из рис. 7, с увеличением времени работы НТГГ удастся получить сравнительно постоянный расход газов на выходе, равный требуемому массовому расходу, что связано с увеличением длины конической части газогенератора при прочих равных условиях (конусности, диаметре элементов укладки, давления).

Характер изменения температуры продуктов газогенерации в выходном сечении НТГГ (рис. 8) при различных значениях  $t_{\max}$  подтверждает преимущества больших времен работы НТГГ, так как при этом на протяжении  $\sim 90\%$  времени его работы температура сохраняется преимущественно постоянной и равной требуемому значению. Однако увеличение времени работы приводит к невыполнению условия (5), и в этом случае обеспечение работоспособности газогенератора требует специальных мероприятий, таких как капсуляция шаровых элементов ТУВ, применение распределенного отвода продуктов газификации и других.

Следует отметить, что соотношение  $G/G_{\text{тр}}$  однозначно связано с температурой продуктов газификации в выходном сечении НТГГ (рис. 9). Для оценки постоянства параметров в выходном сечении в процессе работы НТГГ введем временной показатель  $\theta = t_{0,05}/t_{\max}$ , где  $t_{0,05}$  — время, отсчитываемое от начала работы НТГГ до момента отклонения температуры в выходном сечении на 5% от заданной. Расчеты показывают, что для различных значений  $t_{\max}$ , разница ( $t_{\max} - t_{0,05}$ ) при прочих равных условиях изменяется незначительно. Дальнейший анализ проведен для  $t_{\max} = 100$  с, однако полученные данные могут быть легко интерполированы для других времен работы НТГГ.

На рис. 10 представлена характерная зависимость влияния диаметра  $D_{\text{отн}}$  на температуры в выходном сечении НТГГ при прочих равных условиях. С увеличением диаметра  $D_{\text{отн}}$  уменьшается период работы НТГГ с постоянными расходом и температурой на выходе. Увеличение  $D_{\text{отн}}$  в три раза приводит к снижению показателя  $\theta$  на 6,5%. Причиной снижения  $\theta$  является увеличение массы невыработанного остатка ТУВ из-за уменьшения

плотности конвективного теплового потока. Однако уменьшение размеров элементов укладки может быть ограничено другими технологическими требованиями и условиями по плавлению ТУВ.

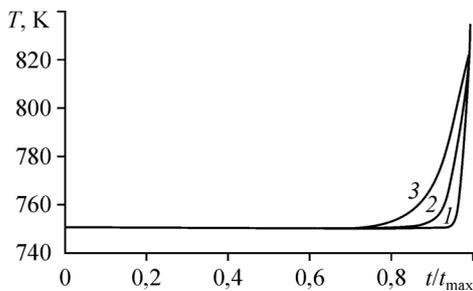


Рис. 10. Изменение температуры в выходном сечении по времени при различных  $D_{\text{отн}}$ .

$D_{\text{отн}} = 0,0125$  (1), 0,025 (2), 0,0375 (3).

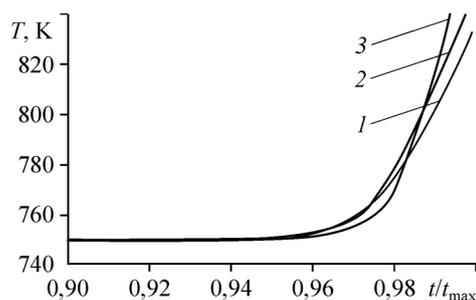


Рис. 11. Изменение температуры на выходе из НТГГ по времени при различных давлениях.  
 $p_{гг} = 1$  (1), 3 (2), 5 (3) МПа.

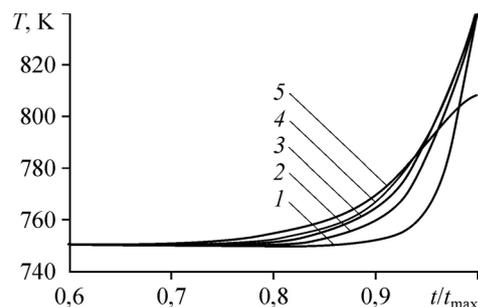


Рис. 12. Изменение температуры на выходе из НТГГ по времени при различных углах конусности.  
 $\alpha = 0^\circ$  (1),  $5^\circ$  (2),  $10^\circ$  (3),  $15^\circ$  (4),  $30^\circ$  (5).

На рис. 11 показаны графики изменения температуры продуктов газификации в выходном сечении НТГГ при различных давлениях  $p_{гг}$ . Влияние давления в НТГГ на характер изменения температуры незначительно и проявляется только на конечном участке работы.

Как показали расчеты, результаты которых приведены на рис. 12, с увеличением угла конусности уменьшается период работы НТГГ с постоянным значением температуры. Это обусловлено уменьшением длины газогенератора при увеличении угла конусности при прочих равных условиях. Для рассматриваемого диапазона  $\alpha$  величина  $\theta$  удовлетворяет неравенству  $0,95 \leq \theta \leq 0,98$ .

Комплексный анализ полученных данных позволил определить зависимость показателя  $\theta$  от  $\alpha$  и  $D_{отн}$  (рис. 13). Данная зависимость справедлива для диапазона давлений в НТГГ от 1 до 5 МПа.

### Выводы

На основе расчетно-параметрического исследования с использованием разработанной математической модели получены следующие результаты.

1. Определены требования к свойствам ТУВ и режимам их газификации, обеспечивающим минимизацию плавления и потери формы шаровых элементов укладки. Показано, что для эффективной газификации ТУВ на основе полиэтилена необходима плотность теплового потока выше «критического» значения, равного  $q_{кр} = (0,6-1,8) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

2. Термодинамический анализ взаимодействия различных активных веществ с ТУВ в двухкамерном НТГГ продемонстрировал эффективность использования октогена и высокоэнтальпийных соединений типа триазина в качестве активного вещества. Температура разложения указанных веществ составляет около 3200 К, что дает возможность превысить плотность теплового потока, действующего на первые ряды шаровых элементов

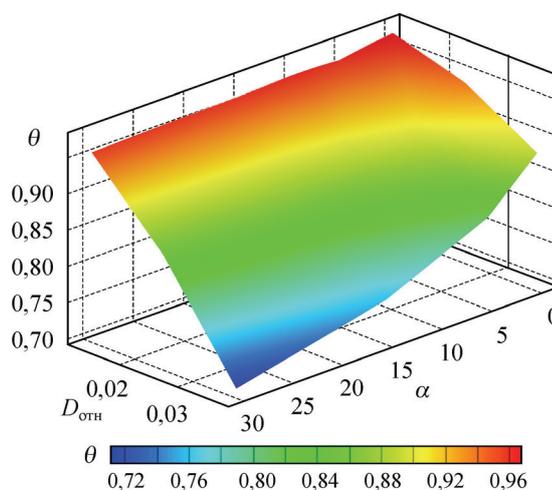


Рис. 13. Зависимость параметра  $\theta$  от величин  $\alpha$  и  $D_{отн}$ .

укладки ТУВ, более чем в 15 раз относительно «критических» значений. Указанные соединения позволяют почти в два раза снизить массовый расход активного вещества, необходимый для газификации ТУВ.

3. Показано заметное влияние диаметра элементов шаровой укладки и угла конусности камеры НТГГ на характер изменения расхода и температуры, в то время как давление на эти величины влияет незначительно. С увеличением диаметра  $D_{отн}$  в три раза относительная продолжительность режима с постоянными параметрами в выходном сечении НТГГ, определяемая показателем  $\theta$ , уменьшается на 17–23 %. Увеличение угла конусности от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  для различных режимов приводит к уменьшению  $\theta$  на 5–15 %.

### Список литературы

1. 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. 152 с.
2. Шабунин А.И., Калинин С.В., Сарабьев В.И., Ягодников Д.А., Полянский А.Р. Результаты исследования и разработки низкотемпературных быстрогорящих газогенерирующих топлив для систем перемещения элементов исполнительных механизмов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2012. № 2. С. 1–13.
3. Аверьков И.С., Арефьев К.Ю., Байков А.В., Яновский Л.С. Исследование эффективности регенеративного охлаждения прямоточной камеры сгорания продуктами газификации энергоконденсированного материала // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1. С. 149–160.
4. Валеева О.В., Ваулин С.Д., Ковин С.Г., Феофилактов В.И. Низкотемпературные твердотопливные газогенераторы. Методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования. Миасс: Изд-во ГРЦ «КБ имени академика В.П. Макеева», 1997. 268 с.
5. Кириллов В.В., Рябухин А.Г. Экспериментальное исследование твердых хладагентов // Вестник ЮУрГУ. 2007. № 3. С. 100–105.
6. Деменов С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках: СПб.: Страта, 2012. 192 с.
7. Токталиев П.Д., Мартыненко С.И. Математическая модель системы охлаждения камер сгорания авиационных прямоточных двигателей на эндотермических топливах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. Т. 58, № 1. С. 85–98.
8. Арефьев К.Ю., Федотова К.В., Яновский Л.С., Аверьков В.С., Байков А.В. Исследование системы охлаждения цилиндрических каналов продуктами газификации твердых углеводородных горючих // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2017. № 1. С. 86–98.
9. 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.
10. Косточко А.В., Казбан Б.М. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства. Физико-химические свойства порохов и ракетных твердых топлив: учеб. пособие. М.: Инфра-М, 2014. 400 с.
11. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
12. Бакулин В.Н., Дубовкин Н.Ф., Котова В.Н., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Яновский Л.С. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. М.: Физматлит, 2009. 400 с.
13. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Междунар. симп. «Горение и плазмохимия», 24–26 августа 2005. Алматы, Казахстан, 2005. С. 52–57.
14. Щукин Е.Р., Красовитов В.Г., Яламов Ю.И. Испарение и конденсационный рост крупных и умеренно крупных капель в газообразных средах при произвольных перепадах температуры // М.: ВИНТИ, 1991. № 3706-ВО91. 142 с.

*Статья поступила в редакцию 26 февраля 2018 г.,  
после переработки — 9 июля 2018 г.*