

# Расчет сжигания токсичного вещества с образованием вертикальной сверхзвуковой струи продуктов сгорания

**А.А. Дорофеев**, канд. техн. наук, д-р пед. наук, профессор,

**И.В. Бурцев**, младший научный сотрудник

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.dorofeev@bmstu.ru

## Ключевые слова:

огневой термический метод уничтожения, двухзонное сжигание, камера жидкостного ракетного двигателя, дожигание в сверхзвуковом потоке, газотермодинамический расчет, воздух, гептил.

*Рассмотрена система сжигания уничтожаемого высокотоксичного вещества с образованием вертикальной сверхзвуковой струи продуктов сгорания, удаляемых в атмосферу на значительную высоту. Предложены методика и алгоритм сопряженного газо- и термодинамического расчета рабочих процессов в двухзонной установке с первичным сжиганием с воздухом в камере, аналогичной жидкостному ракетному двигателю, и дожиганием в сверхзвуковом потоке. Методика апробирована на примере математического моделирования дожигания и параметрического исследования влияния полноты сгорания на состав и свойства продуктов сгорания гептила в воздухе с дожиганием при подаче метана во вторую зону.*

## 1. Введение в проблему

Один из методов обезвреживания токсичных веществ, в частности ракетного топлива и его компонентов, а также технологических жидкостей, например использованного в качестве промывочной среды этанола, метанола или других жидких производственных отходов, состоит в их уничтожении сжиганием и удалением в атмосферу продуктов сгорания с остаточным содержанием токсичных веществ. При этом продукты сгорания выбрасываются в вертикальной струе на некоторую высоту, увеличение которой обеспечивает более интенсивное снижение их концентрации до допустимого уровня за счет смешения с воздухом. Это может быть обеспечено при инерционном подъеме струи отходящих газов за счет ее ускорения до очень высокой и даже сверхзвуковой скорости.

Сущность этого метода заключается в окислении, термическом разложении и других химических превращениях вредных компонентов, происходящих в зоне высокой температуры [1], которая может соз-

даваться в устройствах, аналогичных так называемым печам дожига [2]. Там высокая температура, достаточная для экологически безопасного окисления уничтожаемого вещества, создается сжиганием дополнительного горючего при подаче воздуха, выполняющего функцию как окислителя, так и рабочего тела, образующего разбавляющую и несущую среду для продуктов сгорания, имеющих давление, значительно превышающее атмосферное, и истекающих поэтому со скоростью, существенно меньше скорости звука. Это ограничивает производительность установок такого типа из-за относительно малой скорости обменных процессов, интенсивность которых пропорциональна давлению.

Известен способ двухстадийного, двухзонного уничтожения сжиганием отходов, в частности низкокачественного топлива, химикатов и других токсичных соединений [3]. Уничтожаемая среда, горючее и окислитель подают в первый реактор (первые стадия и зона сжигания), выполненный по типу ка-

меры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), работающего как при соотношении компонентов, близком к стехиометрическому, так и при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 0,5 \dots 1,5$ .

Камера ЖРД имеет только сужающееся (звуковое) сопло, сообщающееся с реализацией режима «внезапного расширения» с объемом камеры дожигания (второй реактор или вторые стадия и зона дожигания), где при большом времени пребывания, порядка  $10^{-2}$  с, происходит завершение дожигания до коэффициента полноты, близкого к 1. Производительность установки повышена за счет интенсификации обменных процессов, идущих, например, при давлении в первой зоне, в камере ЖРД, 0,5–10,0 МПа и температуре, соответствующей реализуемому значению  $\alpha = 0,5–1,5$ , а в камере дожигания поддерживается температура  $T = 1200–1500$  К, при давлении 0,1–5,0 МПа. В [3] даются диапазоны параметров, характеризующих рабочие процессы в камерах сгорания и дожигания, при которых достигается требуемая полнота сжигания токсичных веществ, приведенных авторами способа в качестве примера. Однако приведенные параметры не обеспечивают достижение заявленных характеристик эффективности при уничтожении других типов токсичных сред. При этом давление в камере дожигания, описанной в [3], может обеспечить скорость истечения продуктов сгорания, не превышающую звуковую, с соответствующим ограничением высоты распространения струи в атмосфере.

## 2. Постановка задачи

Преодолеть описанные ограничения можно при образовании сверхзвуковой струи продуктов сгорания, характеристики которой могут быть получены по результатам сопряженных термо- и газодинамических расчетов, описывающих рабочие процессы интегрально и параметрически. Известные и апробированные программные комплексы (ПК) для термодинамических расчетов — определения состава свойств и температуры продуктов реакции [4, 5] и базы данных [6] позволяют оптимизировать режимы работы, например по полноте сгорания или минимизации содержания компонентов типа оксидов азота  $N_xO_y$  или других токсичных, экологически нежелательных соединений, в частности применительно к конкретным уничтожаемым горючим (этанол, несимметричный диметилгидразин  $(CH_3)_2N_2H_2$  — НДМГ с условным названием гептил [7] и т.п.) и применяемым дополнительным компонентам (воздух, кислород, метан или сжиженный природный газ — СПГ [8]).

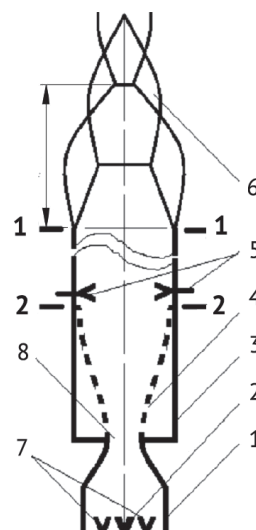


Рис. 1. Схема установки двухзонного сжигания уничтожаемого токсичного вещества

1 — камера сгорания; 2 — форсунки подачи уничтожаемого горючего вещества; 3 — камера дожигания; 4 — граница сверхзвуковой струи; 5 — форсунки подачи дополнительного компонента в камеру дожигания; 6 — сверхзвуковая нерасчетная струя; 7 — форсунки подачи воздуха; 8 — звуковое сопло; 1-1 и 2-2 входное и выходное расчетные сечения камеры дожигания

Авторы поставили задачу разработать методику расчета и параметрической оптимизации подобных процессов двухстадийного сжигания для произвольных компонентов на основе применения апробированных программных и сетевых продуктов [4–6] и опыта термодинамических расчетов высокоинтенсивных газо- и термодинамических процессов в ракетных двигателях [7–10].

Для методик расчета, реализуемых ПК [4, 5], требуется в качестве условий однозначности указывать не только произвольные в общем случае состав, соотношение расходов ( $K_m$ ,  $\alpha$ ) и свойства реагирующих компонентов, но и их давление — статическое  $p$  и полное (давлений торможения)  $p^*$ [7], изменяющееся при движении химически активных рабочих тел по трактам устройства, в котором реализуются рабочие процессы огневой переработки [1], аналогичные проходящим в установках типа печей дожига (паросжигателей) [2], но форсированных по давлению и температуре до уровня, соотносимого с режимами по способу [3].

Схематично (рис. 1) установку для высокоинтенсивного двухстадийного двухзонного сжигания уничтожаемого жидкого горючего вещества, например гептила или этанола, можно представить как размещенную соплом вверх камеру ЖРД, работающую на подаваемом через форсунки 2 уничтожае-

мом горючем и сжатом воздухе, поступающем в камеру через форсунки 7. Поток продуктов сгорания из звукового сопла 8 поступает в камеру дожигания 3, в которой доускоряется, расширяясь в сверхзвуковой струе 4, занимающей на расчетном режиме работы все проходное сечение 1–1 камеры дожигания 3. В камеру дожигания 3 через форсунки 5 подается дополнительный компонент: окислитель, например жидкий кислород, если камера ЖРД работает с избытком горючего при  $\alpha_1 < 1$ , или горючее, метан или СПГ в случае недостатка горючего в продуктах первичного сжигания, т. е. при  $\alpha_1 > 1$ .

### 3. Теоретическая модель рабочего процесса

Дожигание поступивших из камеры ЖРД 1 через конфузорное звуковое сопло 8 продуктов первичного сжигания происходит на цилиндрическом участке камеры дожигания 3 между сечениями 1–1 и 2–2 с образованием в выходном сечении сверхзвуковой недорасширенной струи 6 квазипериодической структуры [9] с длиной повторяющегося характерного фрагмента — «бочки»  $L$ , высота подъема струи составляет 5–7 длин «бочки».

Рабочий процесс в камере 1 ЖРД и в виртуальном сопле с контуром 4 рассчитывается на основе ПК [4, 5] по типовым методикам [7] в адиабатном изоэнтропическом приближении с получением следующих результатов расчета: расход  $\dot{m}_1$ , состав (массовые доли составляющих компонентов, кажущаяся молекулярная масса смеси газов  $\mu_1$ ), свойства (показатель адиабаты  $k_1$  и условный показатель изоэнтропии  $n_1$ ), температура  $T_{a1}$ , давление  $p_{a1}$  и сверхзвуковая скорость  $W_{a1}$ . Они выступают в качестве условий на входе в цилиндрический канал (сечение 1–1), протяженность которого принимается достаточной для завершения в сверхзвуковом потоке тепломассобменных рабочих процессов — вступление в химическое взаимодействие массовой доли  $\varphi$  (коэффициент полноты реакций в зоне дожигания) поступившего дополнительного компонента, т. е. собственно дожигание, и равномерное распределение состава и свойств рабочего тела по сечению 2–2.

Дожигание горючего в ускоряющемся потоке химически активного сжимаемого рабочего тела с изменяющимся составом и свойствами эквивалентно подводу теплоты. Это может привести к изменению полного давления потока [7, 10] и дальнобойности истекающей струи, пропорциональной характерной длине «бочки»  $L$  [9. С. 81]:

$$L \approx 0,89 d_a \sqrt{\frac{p_{a2} - 1,9 p_h}{p_h}}, \quad (1)$$

где:  $d_a$  — диаметр камеры дожигания;  $p_{a2}^*$  — давление торможения истекающего потока;  $p_h$  — давление окружающей среды (атмосферное).

Принимая допущение о незначительном влиянии трения и полагая приближенно равенство показателей адиабаты  $k$  и условного показателя изоэнтропии  $n$ , т. е.  $k \approx n$ , можно записать уравнение сохранения импульса потока в форме, предложенной Б.М. Кисилевым [9. С. 18], для сечений 1–1 (величины с нижним индексом 1) и 2–2 (величины с нижним индексом 2) равной площади  $F_1 = F_2$ :

$$\frac{n_1 + 1}{n_1} \dot{m}_1 a_{кр1} Z(\lambda_1) = \frac{n_2 + 1}{n_2} \dot{m}_2 a_{кр2} Z(\lambda_2) \quad \text{и} \quad (2)$$

$$p_1 f(\lambda_1, n_1) = p_{a2} f(\lambda_2, n_2), \quad (3)$$

где:  $a_{кр}$  — критическая скорость для химически активного потока с текущими параметрами торможения;  $\lambda$  — приведенная скорость потока;  $Z(\lambda)$ ,  $f(\lambda, n)$  — газодинамические функции, согласно [7, 9].

Вводя задаваемый произвольно коэффициент баллаستировки  $g$  [7] как отношение расходов дополнительного компонента, подаваемого в камеру дожигания  $\Delta \dot{m}_2$ , и поступающих в неё из камеры ЖРД продуктов сгорания  $\dot{m}_1$

$$g = \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_1}, \quad (4)$$

запишем расчетное выражение для расхода рабочего тела в сечении 2–2

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 (1 + g). \quad (5)$$

Если принять давление торможения  $p_{a2}^*$ , например в качестве первого приближения, равным давлению в камере ЖРД  $p_k = p_{a1}^*$  и варьировать значение статического давления  $p_{a2}$  в сечении 2–2, то при известном соотношении расходов (5), используя ПК [4, 5] и [6], можно рассчитать температуру торможения  $T_2^*$ , критическую скорость  $a_{кр2}$ , состав, свойства, скорость и условный показатель изоэнтропии  $n_2$ , а из уравнения (2) найти значение газодинамической функции  $Z(\lambda_2)$  и приведенной скорости  $\lambda_2$  по соотношению из [9. С. 20]

$$\lambda_2 = Z(\lambda_2) + \sqrt{(Z(\lambda_2))^2 - 1}. \quad (6)$$

Так можно учесть снижение полного давления потока на участке от сечения 1–1 до сечения 2–2 и найти значение давления  $p_2^*$ , вычисляемое по следующему из уравнения (3) соотношению

$$p_{a2} = p_1 \frac{f(\lambda_1, n_1)}{f(\lambda_2, n_2)}. \quad (7)$$

Должно выполняться уравнение сохранения расхода (5), что, аналогично [10], можно контролировать

$$\text{по вычисляемой удельной площади потока } F'' = \frac{1}{\rho W},$$

[м<sup>2</sup>/(кг/с)], представляющей собой значение площади, которую должен занимать поток с данными параметрами при расходе 1 кг/с. Из соотношений (4) и (5) следует равенство

$$F_2'' = F_1'' = \frac{1}{g+1}, \quad (8)$$

которое должно выполняться с заданной точностью  $\varepsilon_1$  для найденного в итерационном цикле статического давления  $p_{a2}$  и конкретного давления торможения  $p_{a2}^*$ , выступающего в качестве параметра. При этом давление торможения  $p_2^*$ , принятое в качестве условия однозначности термодинамического расчета состава, температуры, критической скорости звука и свойств продуктов дожигания — рабочего тела в сечении 2–2 и рассчитанное по соотношению (7), должны отличаться не более чем на величину, соответствующую заданной допустимой погрешности  $\varepsilon_2$ .

Описанной методике расчета соответствует алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 2. Выполнение блока 2 включает задание условий однозначности для термодинамического расчета камеры ЖРД [7]: давление в камере  $p_k$  и в выходном сечении сопла  $p_{a1}$ , состав (химические или условные формулы), полные энтальпии и выбранное соотношение компонентов топлива в камере ( $K_m$  или  $\alpha$ ). Задаются также состав и полная энтальпия дополнительного компонента, подаваемого в камеру дожигания, а также значение коэффициента балластировки  $g$  (4).

Выполняется термодинамический расчет (блок 3), результаты которого выступают в качестве параметров потока в сечении 1–1 камеры дожигания. По ним рассчитываются левые части уравнений (2) и (3), а также значение удельной площади  $F''$  с учетом соотношения (8).

В блоке 4 начинается итерационный цикл по давлению торможения в выходном сечении 2–2  $p_{2j}^*$  с вложенным итерационным циклом по статическому давлению в этом сечении  $p_{2i}$ . Значение давления в камере ЖРД присваивается давлению торможения в выходном сечении камеры дожигания 2–2, а при последующих итерациях корректируется, например

по алгоритму метода половинного деления (дихотомии).

В блоке 5 выполняется термодинамический расчет для полного давления  $p_{2j}^*$ , статического давления  $p_{2i}$  и состава рабочего тела как результата балластировки продуктов сгорания топлива в камере ЖРД дополнительным компонентом.

В блоке 6 рассчитывается значение удельной площади потока  $F_{2i}''$ .

В блоке 7 сравнивается полученное текущее значение  $F_{2i}''$  с рассчитанным по соотношению (8), если не выполняется условие по точности  $\varepsilon_1$ , то в блоке 4 корректируется значение статического давления  $p_{2i+1} = p_{2i} \pm 1/2\Delta$ , например по алгоритму метода по-

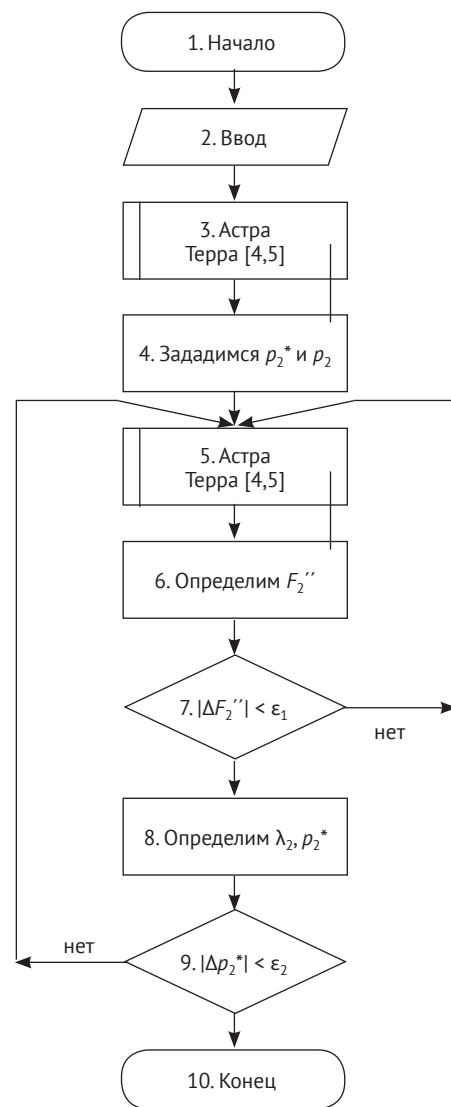


Рис. 2. Блок-схема алгоритма газо- и термодинамического расчета установки двухзонного сжигания уничтожаемого горючего вещества

ловинного деления (дихотомии), до удовлетворения условий блока 7.

После этого в блоке 8 по выражениям (2), (6) и (7) выполняется расчет  $\lambda_{2j}$  и  $p_{2j}^*$ , значение которого в блоке 9 сравнивается с давлением торможения, принятым для термодинамического расчета в блоке 5. Если рассогласование больше допустимого (условие по точности  $\varepsilon_2$  не выполнено), то в блоке 4 корректируется значение  $p_{2j+1}^* = p_{2j}^* \pm 1/2\Delta$ , и цикл повторяется до выполнения условия по точности  $\varepsilon_2$ , проверяемое в блоке 9. Причем с учетом технической достижимой точности измерения и поддержания характерных значений давлений, температуры и расходов в диапазоне не уже  $\pm 0,1\%$  такие же требования можно установить для итерационных циклов.

Если давление торможения потока в сечении 2–2  $p_2^*$  практически не меняется от итерации к итерации в цикле варьирования  $p_{2j}^*$ , т. е. отличие не превышает  $0,1\%$ , то расчет считается выполненным. В итоге получаем значения полного и статического давления потока, формирующего выхлопную струю продуктов двухступенчатого двухзонного сжигания, характеризующихся содержанием токсичных и/или экологически опасных компонентов, например оксидов азота  $N_xO_y$ .

Варьирование такими параметрами, выступающих условиями однозначности для термодинамического расчета, как соотношение компонентов, коэффициент балластирования, давление в камере ЖРД и камере дожигания, позволяет не только получить размеры проточной части установки и ожидаемые характеристики выходящих в атмосферу продуктов сжигания вредных горючих веществ, но и оценить дальнобойность газовой струи, например по соотношению (1) из [9].

#### 4. Численные эксперименты и обсуждение результатов

В качестве примера для апробации данного алгоритма (рис. 2) рассчитаны характеристики двухзонного сжигания уничтожаемого горючего — гептила с условной формулой  $C_2N_2H_8$  и полной энтальпией  $I_n = 828,986$  кДж/кг [7] — в установке, схема которой представлена на рис. 1. В качестве окислителя для зоны первичного сжигания выбран сжатый воздух, подаваемый в камеру первичного сжигания 1 — ЖРД с давлением в камере сгорания  $p_k = 5,0$  МПа и в выходном сечении 1–1 свободно расширяющегося звукового потока  $4 p_a = 0,30$  МПа с критическими параметрами в выходном сечении сопла 8. Соотношение расхода воздуха и уничтожаемого горючего в ЖРД выбрано соответствующим коэффициенту избытка окислителя  $\alpha = 1,5$ .

При рассчитанном стехиометрическом соотношении расхода для данной топливной пары  $K_{m0} = 9,2035$  отношение расхода воздуха и гептила  $K_m = 13,8$ . Расчетная температура в камере сгорания ЖРД превышает  $2100$  К, а в продуктах сгорания имеется избыток окислительных элементов (удельная формула  $C_{2,2575}N_{52,5317}H_{8,99104}O_{13,5061}Ar_{0,298849}$  и полная энтальпия  $I_n = 369,3$  кДж/кг). Это делает возможным дожигание во второй зоне (в камере дожигания 3) с повышением температуры при подаче дополнительного горючего, в данном случае выбран метан  $CH_4$ , расход которого рассчитан исходя из достижения стехиометрического,  $\alpha = 1$ , соотношения горючих и окислительных элементов в камере дожигания, чему отвечает коэффициент балластирования  $g = 0,01803$ .

Предполагая, что длина участка камеры дожигания 3 достаточна для полного сжигания подаваемого дополнительного горючего — метана — и установления равновесного состояния рабочего тела в выходном сечении 2–2, следуя предложенному алгоритму расчета (для достижения сходимости итерационных процессов при  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,1\%$  оказалось достаточным 7–9 приближений), получили повышение температуры торможения до  $T_2^* = 2502,9$  К и статической температуре до  $T_2 = 2236,4$  К при снижении полного давления от  $p_1^* = 5,0$  МПа до  $p_2^* = 1,97$  МПа и установлении статического давления в выходном сечении  $p_2 = 0,98$  МПа, что соответствует недорасширенному сверхзвуковому потоку с числом Маха  $M_{a2} = 1,106$  и скоростью  $W_{a2} = 998,6$  м/с. Отметим, что согласно (1) из [9], осевую протяженность «бочки» — характерного элемента квазипериодической структуры струи 6 — можно оценить по полученным расчетным данным как  $1,5$ – $2$  диаметра камеры дожигания при сохранении структуры струи как относительно устойчивой структуры, содержащей до  $3$ – $5$  «бочек».

Предложенная методика позволила исследовать влияние неполноты сгорания дополнительного компонента  $\varphi$  — метана — в зоне дожигания, что, согласно [8], моделировалось фиксацией его концентрации  $M_{CH_4}$  [моль/кг] в выходном сечении 2–2 камеры дожигания от нулевой — для полноты сгорания  $\varphi = 1$  — до максимально возможной —  $M_{CH_4} = 1,106$  моль/кг, соответствующей массовой доле  $1,77\%$ , когда  $\varphi = 0$ , т. е. весь метан не вступает в реакцию и выполняет только роль балластирующего инертного компонента. Причем при прохождении камеры дожигания повышение температуры торможения потока (тепловое сопротивление) наблюдалось только на интервале  $0,25 < \varphi \leq 1,0$ . При меньших значениях  $\varphi$ , согласно расчетам, температура торможения потока уменьша-

Пример расчетных данных

№	Параметр	Камера ЖРД		Камера дожигания			
		1,0	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0
1	$\varphi$	1,0	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0
2	$T_{a2}^*$ , К	2117,6	2064,4	2149,8	2287,5	2412,6	2502,9
3	$T_{a2}$ , К	1157,8	1434,6	1570,5	1792,7	2004,3	2236,4
4	$p_{a2}^*$ , МПа	5,0	2,78	2,52	2,24	2,091	1,97
5	$p_{a2}$ , МПа	0,3	0,457	0,517	0,628	0,750	0,98
6	$M_2$	2,448	1,864	1,721	1,515	1,347	1,106
7	$W_{a2}$ , М/с	1632,2	1370,5	1325,2	1245,6	1165,5	998,6
8	$F \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> ·с/кг	6992,0	6864,0	6869,0	6868,0	6874	6873,0
9	$e_1$ , %	—	0,058	0,015	0,0	0,087	0,073
10	$e_2$ , %	—	0,036	0,04	0,089	0,096	0,102

ется и может проявиться так называемая термокомпрессия — увеличение полного давления.

Результаты расчетов представлены в таблице, а также на рис. 3 и 4 в виде графиков, где кривым соответствуют результаты расчета по сжиганию гептила, а по оси абсцисс отложено значение параметра  $\varphi$ , полноты вступления в реакцию дополнительного компонента — метана. Графики иллюстрируют изменение температуры торможения  $T_{2a}^*$  и давления торможения  $p_{2a}^*$  продуктов сгорания в выходном сечении камеры дожигания и камеры ЖРД.

### 5. Выводы

Проведенные расчеты показали, что рассмотренные высокоинтенсивные режимы работы установки дожигания уничтожаемого вещества с образованием сверхзвуковой струи продуктов сгорания, удаляемых в атмосферу, термодинамически реализуемы. Предложенная методика и алгоритм сопряженных газо- и термодинамических расчетов на основе апробированного программного обеспечения [4–6]

и инженерных методов расчета [7–10] позволяет параметрически моделировать работу установок по двухзонному сжиганию уничтожаемого горючего вещества на режимах со сверхзвуковой скоростью в камере дожигания. Возможно также рассчитать условия однозначности для задач термодинамического расчета состава поступающих в атмосферу продуктов сгорания с определением содержания нежелательных токсичных и экологически опасных компонентов для задаваемых компонентов топлива в зависимости от режимов работы по соотношению компонентов и давлениям; выявить пределы реализуемых рабочих режимов и оптимизировать режимные параметры работы установки по заданным критериям эффективности, например, построенных на учете удельных расходов компонентов при выполнении требований по концентрации нежелательных компонентов в поступающих в атмосферу продуктах сгорания; рассчитать основные радиальные размеры (проходные сечения) проточной части установки и оценить изменение дальности

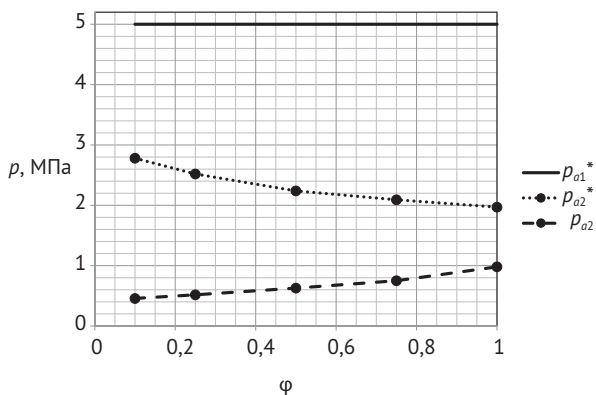


Рис. 3. Зависимость давления от полноты сгорания метана

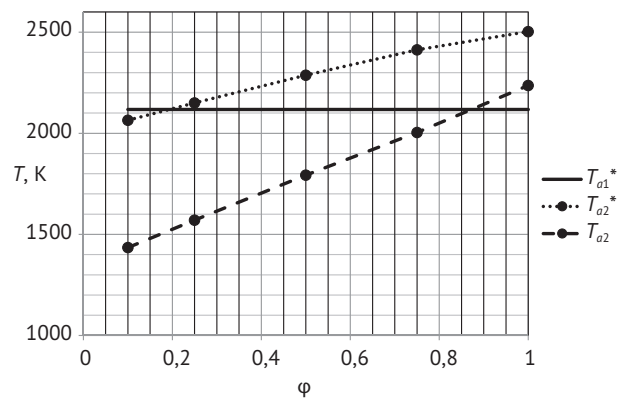


Рис. 4. Зависимость температуры от полноты сгорания метана

недорасширенной истекающей в атмосферу струи продуктов сгорания уничтожаемого горючего в зависимости от реализуемых режимных параметров. Примененное в процессе разработки данной методики программное и информационное обеспечение, апробированное при выполнении газо- и термодинамических расчетов применительно к рабочим процессам в ракетных двигателях, а также выполненное численное моделирование рабочих процес-

сов с анализом реализуемости рабочих режимов позволяет рекомендовать результаты данной работы в качестве основы для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований процессов эффективного уничтожения горючих веществ методом сжигания, в том числе расчета осевых размеров проточной части, в частности длины камеры дожигания, достаточной для достижения требуемой полноты сгорания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П.* Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. М.: Химия, 1990.
2. Печи дожига (паросжигатели). URL: <http://www.generation-nho.ru>—обращение 15.07.2016
3. Способ уничтожения супертоксиных соединений: пат. 2072477 Рос. Федерация: МПК F23G5/00 Сжигание отходов; конструкции мусоросжигательных печей; детали, принадлежности печей; управление печами, F23G7/00 Печи или другие устройства, специально предназначенные для уничтожения специфических отходов или низкокачественного топлива, например химикатов/ Колбановский Ю.А., Белый В.В., Григорьев А.С., Дулатов Р.Д., Россихин И.В., Щипачев В.С., Платэ Н.А.; патентообладатель Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН; заявл. 08.05.1990; опубл. 27.01.1997
4. *Trusov B.G.* Program system TERRA vor simulation phase and chemical equilibrium// Proc. of the XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics, St-Petersburg, Russia, 2002. P. 483–484.
5. *Трусов Б.Г.* Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких темпе-

- ратурах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 1. С. 21. DOI: 10.18698/2308–6033–2012–1–31
6. База данных «Термические Константы Веществ». Рабочая версия 2 (электронный аналог Справочника «Термические Константы Веществ» в 10 томах; Под ред. В.П. Глушко, 1965...1982 гг.). Рук. работы Иориш В.С. и Юнгман В.С.: URL: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/> welcome.html (обращение 06.01.16).
7. *Дорофеев А.А.* Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014.
8. *Дорофеев А.А., Ягодников Д.А., Чертков К.О.* Особенности расчета состава и температуры продуктов сгорания переобогащенных кислород-метановых топлив // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2015. № 10. С. 85–95.
9. *Шишков А.А.* Газодинамика пороховых ракетных двигателей: инженерные методы расчета. М.: Машиностроение, 1968.
10. *Дорофеев А.А., Розинский С.М.* Расчет состава и свойств газообразных продуктов сгорания топлива в скоростной камере// Известия ВУЗов. Машиностроение. 2003. № 4. С. 49–52.

## REFERENCES

1. *Bernadiner M.N., Shurygin A.P.* *Ognevaya pererabotka i obezvrezhivanie promyshlennykh otkhodov* [Fire recycling and disposal of industrial waste]. Moscow, Khimiya Publ., 1990 (in Russian).
2. *Pechi dozhiga (paroszhigateli)* [incinerator (fat burners)]. Available at: <http://www.generation-nho.ru> (accessed 15 July 2016) (in Russian).
3. *Kolbanovskiy Yu.A., Belyy V.V., Grigor'ev A.S., Dulatov R.D., Rossikhin I.V., Shchipachev V.S., Plate N.A.* Sposob unichtozheniya supertoksichnykh soedineniy: pat. 2072477 Ros. Federatsiya: MPK F23G5/00 Szhiganie otkhodov; konstruksii musoroszhi-gatel'nykh pechey; detali, prinadlezhnosti pechey; upravlenie pechami, F23G7/00 Pechi ili drugie ustroystva, spetsial'no prednaznachennye dlya unichtozheniya spetsificheskikh

- otkhodov ili nizkokachestvennogo topliva, naprimer khimikatov [The method of destruction supertoxic compounds: US Pat. 2072477 Russian Federation: IPC F23G5 / 00 Incineration of waste; design musoroszhigatelnyh furnaces; parts, stoves accessories; stoves management, F23G7 / 00 Stoves or other apparatus specially adapted for the destruction of specific waste or low grade fuels, eg chemicals]. *Patentobladatel' Institut neftekhimicheskogo sinteza im. A.V. Topchieva RAN* [patentee Institute of Petrochemical Synthesis. Topchiev RAS] (in Russian).
4. *Trusov B.G.* Program system TERRA vor simulation phase and chemical equilibrium// Proc. of the XIV Intern. Symp. on Chemical Thermodynamics, St-Petersburg, Russia, 2002. — P. 483–484.

- Trusov B.G. Programmnaya sistema modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnesiy pri vysokikh temperaturakh [Program system for the modeling phase and chemical equilibria at high temperatures]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering magazine: Science and innovations]. 2012, I. 1, p. 21 (in Russian).
- Baza dannykh «Termicheskie Konstanty Veshchestv» [Database “Thermal Constants of Substances”]. Available at: <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/welcome.html> - (accessed 06 January 16) (in Russian).
- Dorofeev A.A. *Osnovy teorii teplovykh raketnykh dvigateley. Teoriya, raschet i proektirovanie* [Fundamentals of the theory of thermal rocket engines. Theory, calculation and design]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2014 (in Russian).
- Dorofeev A.A., Yagodnikov D.A., Chertkov K.O. Osobennosti rascheta sostava i temperatury produktov sgoraniya pereobogashchennykh kislorod-metanovykh topliv [Features of the calculation of the composition and temperature of the combustion pereobogaschenie oxygen-methane fuel products]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of the universities. Mechanical Engineering]. 2015, I. 10, pp. 85–95 (in Russian).
- Shishkov A.A. *Gazodinamika porokhovykh raketnykh dvigateley: inzhenernye metody rascheta* [Gasdynamics propellant rocket motors: engineering calculation methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968 (in Russian).
- Dorofeev A.A., Rozinskiy S.M. Raschet sostava i svoystv gazo-obraznykh produktov sgoraniya topliva v skorostnoy kamere [Calculation of the composition and properties of gaseous combustion products in a high-speed camera]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of the universities. Mechanical Engineering]. 2003, I. 4, pp. 49–52 (in Russian).

## Calculation of Toxic Substance Burning with Formation of Combustion Products' Vertical Supersonic Stream

A.A. Dorofeev, Ph.D. in Engineering, Doctor of Pedagogy, Professor, Bauman Moscow Technical State University  
I.V. Burtsev, Junior Researcher, Bauman Moscow Technical State University

*A system for burning of a destroyed highly toxic substance with formation of a vertical supersonic stream of combustion products moved away to the atmosphere on considerable heights has been considered. A technique and an algorithm for conjugated gas-dynamic and thermodynamic calculation of working processes in two-zonal unit with primary burning using air in a camera similar to the one of a liquid rocket engine, and after-burning in a supersonic flow have been proposed. The technique has been approved on the examples of after-burning mathematical modeling and a parametrical research on combustion completeness influence on composition and properties of products resulting from heptyl combustion in air with after-burning in case of methane supply in the second zone.*

**Keywords:** firing thermal destruction method, two-zone burning, chamber of liquid rocket engine, after-burning in supersonic flow, gas-dynamical calculation, air, heptyl.

### Утверждён паспорт приоритетного проекта «Чистая страна»

По итогам заседания президиума Совета при Президенте России по стратегическому развитию и приоритетным проектам 21.12.2016 утверждён паспорт одного из приоритетных проектов — «Чистая страна».

*Ключевая цель проекта* — уменьшить экологический ущерб, связанный с захоронением твёрдых бытовых отходов, снизить экологические риски, связанные с объектами накопленного вреда окружающей среде, а также создать интерактивную информационную систему, которая обеспечит выявление и ликвидацию несанкционированных свалок мусора на основании сообщений граждан и общественных организаций.

*Срок реализации проекта* — с января 2017 г. по 2025 г. (включительно).

Реализация приоритетного проекта предусматривает строительство пяти мусоросжигательных заводов: четыре в Московской области и один в Республике Татарстан, а также восстановление и рекультивацию полигонов, как объектов накопленного экологического ущерба.

Работа мусоросжигательных заводов позволит к 2023 г. снизить объём размещения отходов на полигонах ТКО Московской области на 30%. В Казани планируется достичь модели «нулевого захоронения». В целом это улучшит экологические условия проживания 23 млн человек.

Кроме того, в результате реализации проекта объём выбросов парниковых газов должен сократиться примерно на 840 000 т CO<sub>2</sub>-эквивалента в год.

Также в рамках реализации проекта планируется восстановить и рекультивировать около 1500 га земель, подверженных негативному влиянию объектов накопленного вреда, что улучшит экологические условия проживания 4,3 млн человек к 2025 г.