

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ СЖИГАНИЯ ГОРЮЧИХ И РАЗЛОЖЕНИЯ ЗАКИСИ АЗОТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ И НАГРЕВА РАБОЧЕГО ТЕЛА ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ УСТАНОВКИ КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА

В. В. Шумский

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, shumsky@itam.nsc.ru

Исследована работа высокоэнтальпийной установки кратковременного режима с двойной форкамерой при воспроизводстве в набегающем на модель потоке натуральных значений давления торможения и физической энтальпии торможения. Нагрев рабочего тела осуществляется за счет сжигания в первой форкамере горючих: водорода, пропана (трехкомпонентная исходная смесь: горючее + воздух + компенсирующий кислород) либо комбинации этих горючих с закисью азота (четырёхкомпонентная исходная смесь: горючее + закись азота + воздух + компенсирующий кислород либо компенсирующий азот). Для всех горючих состав исходной смеси, накачиваемой в первую форкамеру, обеспечивает получение потока с массовой долей кислорода, равной массовой доле кислорода в атмосферном воздухе (0,231). Расчеты выполнены для диапазона чисел Маха $M_H = 4 \div 7$ и траектории полета со скоростным напором $\approx 0,6$ бар.

Ключевые слова: высокоэнтальпийная установка, натурные параметры полета, форкамера, химический подогрев, водород, пропан, закись азота.

Для исследования газодинамических моделей с горением требуется воспроизводить натурные давления и температуры торможения [1], поскольку скорости химических реакций и условия воспламенения (особенно самовоспламенения) существенно зависят от давления и температуры. Поэтому при испытаниях газодинамических моделей с горением обычное для аэродинамического эксперимента требование выдерживать критерии Маха, Рейнольдса, Стантона и другие дополняется требованием выдерживать абсолютные значения натуральных давления и температуры.

Опыт показывает, что при умеренных гиперзвуковых числах Маха $M_H \approx 8$ параметры рабочего тела (потока), необходимые для исследования газодинамических моделей с горением, достаточно просто обеспечиваются в высокоэнтальпийных установках кратковременного режима типа ИТ-302М ИТПМ СО РАН [1]. Как увеличение, так и уменьшение чисел Маха от указанного значения требуют (хотя и по разным причинам) увеличения энергетики установки. В [2] в принципиальном плане показано, что химический подогрев позволяет решить проблемы энергетики высокоэнтальпийных установок кратковременного режима в схеме с двойной форкамерой при уменьшении значений M_H до ≈ 4 при значительном электричес-

ком подогреве. Однако в [2] не рассматривались ограничения, связанные с существованием пределов воспламенения химических веществ, используемых для нагрева потока.

В настоящей работе проводится сравнение эффективности использования водорода, пропана и их композиций с закисью азота с точки зрения количества горючего, необходимого для воспроизведения натуральных значений энтальпии и давления, а также условий их воспламенения. При этом нагрев за счет электрической энергии отсутствует и все тепло, подводимое к потоку в процессе с $v = \text{const}$, выделяется за счет химической реакции.

Схема установки и методика расчета. Условия полета, моделирование которых рассмотрено в настоящей статье, приведены в табл. 1. Соотношения чисел Маха M_H и высоты полета H соответствуют полету со скоростным напором $\approx 0,6$ бар. Параметры воздуха на высоте H взяты из [3], значения энтальпии и энтропии воздуха в зависимости от p_H и T_H (давление и температура воздуха на высоте H) — из [4].

Схема установки с двойной форкамерой приведена на рис. 1. Давление в первой форкамере $p_{\Phi 1}(0)$ задается параметрически в диапазоне $200 \div 1000$ бар. Из первой форкамеры через отверстие площадью F_{1-2} смесь истекает во вторую. За счет дросселирования давление

Таблица 1

M_n	H , км
4	20
5	23
6	25
7	27

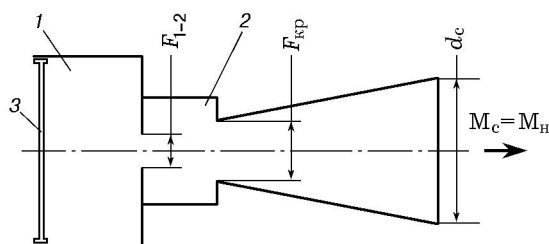


Рис. 1. Схема установки:

1 — первая форкамера, 2 — вторая форкамера,
3 — поршень

изменяется от $p_{\phi 1}(0)$ до $p_{\phi 2}$ — давления во второй форкамере, равного давлению торможения набегающего на модель потока p_{0c} . По условию задачи давление p_{0c} должно воспроизводить давление торможения p_{0n} , которое имеет место при полете с числом M_n на высоте H . Исходная смесь накачивается в первую форкамеру под таким давлением, чтобы после завершения химической реакции в процессе с $v = \text{const}$ давление в первой форкамере стало бы равным заданной параметрической величине $p_{\phi 1}(0)$.

Доля горючего в исходной смеси должна быть такой, чтобы после завершения всех химических реакций в первой форкамере энтальпия рабочей смеси равнялась энтальпии торможения набегающего потока. Поскольку процесс дросселирования изоэнтальпийный, в установке выполняется условие $h_{\phi 1}(0) = h_{\phi 2} = h_{0n}$, где $h_{\phi 1}(0)$, $h_{\phi 2}$, h_{0n} — физические энтальпии рабочей смеси в первой, второй форкамерах и энтальпия торможения набегающего потока. Здесь и далее символы в скобках (н) и (0) обозначают параметры накачки исходной смеси в первую форкамеру и параметры рабочей смеси в ней в момент времени $\tau = 0$.

Рассмотренная схема позволяет иметь давление в первой форкамере независимо от воспроизводимого в установке давления $p_{0c} = p_{0n}$ и за счет условия $p_{\phi 1} \gg p_{0n}$ дает возможность существенно увеличить время режима. Полученную в результате химического подо-

грева смесь можно назвать составной, так как она включает в себя большое количество индивидуальных веществ: O_2 , N_2 , H_2O , CO_2 , несгоревшее горючее (если полнота сгорания горючего $\eta_{гор} < 1$), неразложившуюся часть закиси азота (если полнота разложения N_2O $\eta_{N_2O} < 1$), продукты диссоциации перечисленных веществ. Но, как и для воздуха, основная доля в этой смеси приходится на кислород (23 % по массе) и азот (60 ÷ 73 % по массе).

В первую форкамеру накачивается исходная смесь, состоящая из горючего (масса горючего $G_{гор.\phi 1}(н)$) + закиси азота ($G_{N_2O \phi 1}(н)$) + воздуха ($G_{возд.\phi 1}(н)$) + добавочного кислорода либо азота ($G_{O_2 \phi 1}(н)$, либо $G_{N_2 \phi 1}(н)$) для компенсации выгоревшего в результате химической реакции кислорода или компенсации избытка кислорода и создания массовой доли кислорода в продуктах реакции $g_{O_2} = 0,231$. В общем случае для накачиваемой четырехкомпонентной смеси

$$G_{см.\phi 1}(н) = G_{гор.\phi 1}(н) + G_{N_2O \phi 1}(н) + \\ + G_{возд.\phi 1}(н) + G_{O_2 \phi 1}(н) + G_{N_2 \phi 1}(н).$$

Если закись азота отсутствует (и, следовательно, в исходную смесь не добавляется азот), то накачиваемая в первую форкамеру исходная смесь будет трехкомпонентной — горючее, воздух и компенсирующий кислород.

Таким образом, рабочее тело — реальный воздух — заменяется:

- до химической реакции (после накачки) исходной смесью газов при температуре накачки $T_{\phi 1}(н) = 300$ К;
- после химической реакции смесью продуктов сгорания, несгоревшей части горючего и неразложившейся части закиси азота, так как полнота сгорания горючего $\eta_{гор}$ и полнота разложения закиси азота η_{N_2O} могут быть меньше единицы; в расчетах принималось $\eta_{гор} = 0,95$, $\eta_{N_2O} = 0,95$.

Соотношение компонентов в исходной смеси определяет количество химических элементов O, H, C, N, Ar, на которые составляется условная (эквивалентная) формула [5]. С помощью эквивалентной формулы проводится термодинамический расчет и определяются теплофизические свойства продуктов реакции. В продуктах реакции учитывались следующие индивидуальные вещества: O_2 , H_2 , OH, H_2O , HO_2 , CO, CO_2 , CH, CH_2 , N_2 , NO, NO_2 , N_2O ,

NH, NH₂, NH₃, NHO, CN, O, H, C, N, Ar. Термодинамические свойства индивидуальных веществ в идеально-газовом состоянии принимались по данным [6].

Система нелинейных алгебраических уравнений термодинамического равновесия, включающая 24 уравнения, решалась методом Ньютона при $p = \text{const}$, $T = \text{const}$.

Температура продуктов сгорания определялась из равенства удельной полной стандартной внутренней энергии исходной смеси и удельной полной стандартной внутренней энергии продуктов реакции в момент времени $\tau = 0$:

$$i_{\phi 1}(0) - p_{\phi 1}(0) \cdot v_{\phi 1}(0) = i_{\text{см.}\phi 1}(\text{н}) - p_{\text{см.}\phi 1}(\text{н}) \cdot v_{\text{см.}\phi 1}(\text{н}),$$

где $i_{\phi 1}(\text{н})$, $i_{\phi 1}(0)$ — удельные полные стандартные энтальпии исходной смеси и продуктов реакции [5, 6], v — удельный объем.

Температура продуктов сгорания $T_{\text{пр.}\phi 1}(0) = f(p_{\phi 1}(0), h_{0\text{н}})$, давление исходной смеси $p_{\text{см.}\phi 1}(\text{н})$, накачиваемой в первую форкамеру, количества горючего, воздуха, добавочного кислорода определялись методом последовательных приближений. В качестве начальных данных принимались величины, полученные для чистого воздуха.

Таким образом, состав и параметры составной рабочей смеси рассчитывались в идеально-газовом состоянии, т. е. с учетом зависимости от температуры энергии внутренних степеней свободы и диссоциации, но без учета межмолекулярного взаимодействия. Однако при сравнительно небольших воспроизводимых в форкамерах температурах (например, $T_{\phi 1}(0) \approx 880$ К при $M_{\text{н}} = 4$) и давлениях $p_{\phi 1}(0) > 200 \div 300$ бар роль межмолекулярных взаимодействий может быть заметной. Поэтому для оценки влияния неучета межмолекулярных взаимодействий при определении по изложенной методике энергетических характеристиками установки их сравнивали с характеристиками установки для случая, когда рабочим телом считался реальный воздух. Параметры реального воздуха брали из работы [4], где они приведены с учетом зависимости от давления и температуры энергии внутренних степеней свободы, диссоциации O₂, N₂ на O, N, NO, межмолекулярного взаимодействия.

Для уточнения массы горючего, накачиваемого в первую форкамеру, требуется знать тепловой эффект реакции сгорания $(H_u)_v$ в

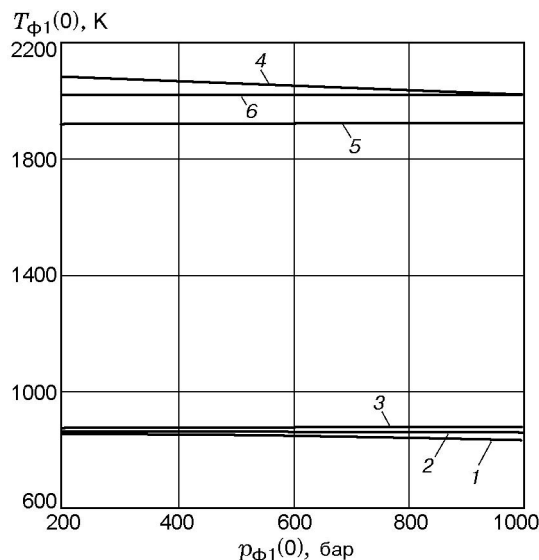


Рис. 2. Температура рабочей смеси в первой форкамере после подвода тепла в процессе с $v = \text{const}$ при соблюдении условия $h_{\phi 1}(0) = h_{0\text{н}}$:

1-3 — $M_{\text{н}} = 4$, $H = 20$ км; 4-6 — $M_{\text{н}} = 7$; $H = 27$ км; 1, 4 — чистый воздух; 2, 5 — водород в качестве горючего; 3, 6 — пропан в качестве горючего

процессе с $v = \text{const}$. Поскольку в справочниках дается величина теплового эффекта реакций при $p = \text{const}$ (H_u)_p, то значения $(H_u)_v$ определяли по стандартной методике, изложенной, например, в [7]:

$$(H_u)_v = (H_u)_p + RT_{\phi 1}(\text{н})\Delta N,$$

где $\Delta N = N_{\text{пр}} - N_{\text{исх.см}}$ — изменение числа молей в процессе реакции, $N_{\text{пр}}$ — число молей продуктов реакции, $N_{\text{исх.см}}$ — число молей исходной смеси, R — универсальная газовая постоянная.

Работа установки на трехкомпонентной смеси. Для трехкомпонентной исходной смеси нагрев рабочей смеси в первой форкамере осуществляется за счет сжигания горючего, входящего в состав исходной смеси. На рис. 2 приведены температуры рабочей смеси в первой форкамере после сгорания горючего с полной $\eta_{\text{гор}} = 0,95$ при выполнении требования $h_{\phi 1}(0) = h_{0\text{н}}$ для двух условий полета: $M_{\text{н}} = 4$, $H = 20$ км ($h_{0\text{н}} = h_{\text{н}} + V_{\text{н}}^2/2 = 913$ кДж/кг) и $M_{\text{н}} = 7$, $H = 27$ км ($h_{0\text{н}} = 2409$ кДж/кг), где $h_{\text{н}}$ и $V_{\text{н}}$ — энтальпия и скорость полета на высоте H . Видно, что температура продуктов реакции трехкомпонентной смеси достаточно близка

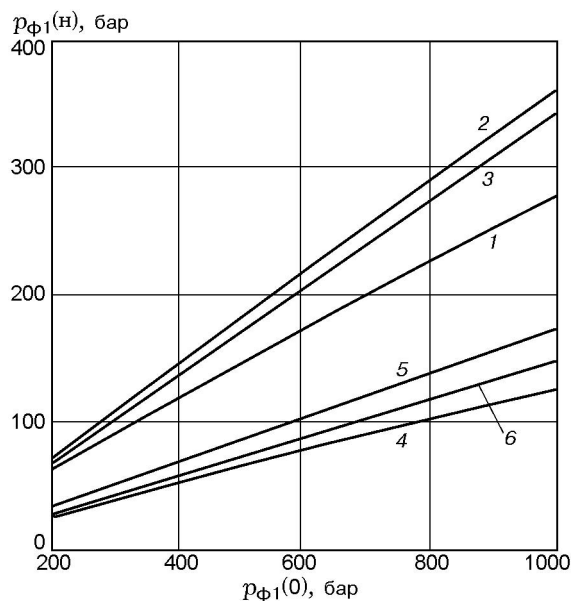


Рис. 3. Давление накачки рабочей смеси в первую форкамеру:

1–3 — $M_n = 4$, $H = 20$ км; 4–6 — $M_n = 7$, $H = 27$ км; 1, 4 — воздух; 2, 5 — водород в качестве горючего; 3, 6 — пропан в качестве горючего

ка к температуре рабочей смеси, представляющей собой чистый воздух. В отличие от воздуха температура $T_{\phi 1}(0)$ для продуктов реакции не зависит от давления $p_{\phi 1}(0)$. Объясняется это следующим. Параметры продуктов реакции рассчитывались в идеально-газовом состоянии, т. е. с учетом зависимости от температуры энергии внутренних степеней свободы и диссоциации, но без учета межмолекулярного взаимодействия. Поскольку до температур ≈ 2080 К, рассматриваемых в данных расчетах, диссоциация продуктов реакции незначительна и, следовательно, невелико влияние на нее давления, то для продуктов реакции температура $T_{\phi 1}(0)$ практически не зависит от давления. В то же время параметры воздуха рассчитывались с учетом межмолекулярного взаимодействия, т. е. для воздуха при расчете значения $T_{\phi 1}(0)$ при $h = \text{const}$ учитывалась зависимость температуры от давления. При $M_n = 4$, $H = 20$ км и $M_n = 7$, $H = 27$ км значения T_{0n} составляют соответственно 882 и 2091 К.

На рис. 3 представлены давления накачки исходной смеси в первую форкамеру, обеспечивающие после сжигания горючего давление $p_{\phi 1}(0)$ и энтальпию $h_{\phi 1}(0) = h_{0n}$. Для всех значений M_n и $p_{\phi 1}(0)$ давление накачки трехком-

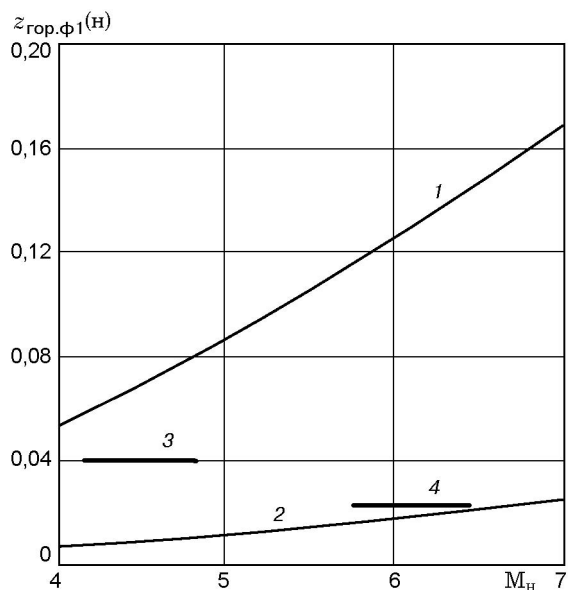


Рис. 4. Мольные доли горючего, накачиваемого в первую форкамеру:

1 — водород; 2 — пропан, 3, 4 — нижние пределы воспламенения водорода и пропана соответственно

понентной смеси выше, чем для чистого воздуха. Объясняется это, с одной стороны, различием теплофизических свойств исходной смеси после накачки и продуктов реакции после сгорания горючего. С другой стороны, влияет неучет межмолекулярного взаимодействия в продуктах сгорания, что, как указано выше, приводит к некоторому отличию от характеристик установки, работающей на воздухе, для которого это влияние учитывалось. Из рис. 3 видно, что при $M_n = 7$ уровень давлений накачки типичный для высокоэнтальпийных установок типа ИТ-302М и находится в пределах $p_{\phi 1}(h) = 40 \div 150$ бар. При $M_n = 4$ для обеспечения давления $p_{\phi 1}(0) > 500$ бар необходимы значения $p_{\phi 1}(h)$, существенно превышающие этот уровень.

Условия вынужденного воспламенения горючего в смеси определяются его мольной долей. На рис. 4 приведены мольные доли горючего $z_{\text{гор.}\phi 1}(h)$, накачиваемого в первую форкамеру, необходимые для воспроизводства энтальпии набегающего на модель потока. Мольные доли горючего не зависят от давления в первой форкамере, поскольку для любых значений $p_{\phi 1}(0)$ должно выдерживаться соотношение $h_{\phi 1}(0) = h_{0n}$. В зависимости от $p_{\phi 1}(0)$ количество горючего изменяется, но его мольная доля при $M_n = \text{const}$ остается неизменной.

Таблица 2

M_H	Массовые доли индивидуальных веществ в составной рабочей смеси, %										
	O ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	OH	CO ₂	CO	NO	H ₂	C ₃ H ₈	N ₂ O
Трехкомпонентная исходная смесь: H ₂ + O ₂ + воздух											
4	23,1	73,3	1,27	3,30	—	—	—	—	0,02	—	—
5	23,1	70,1	1,23	5,50	—	—	—	0,01	0,03	—	—
6	23,1	67,3	1,18	8,25	—	—	—	0,13	0,05	—	—
7	22,8	63,4	1,11	12,00	0,02	—	—	0,56	0,07	—	—
Трехкомпонентная исходная смесь: C ₃ H ₈ + O ₂ + воздух											
4	23,1	71,2	1,25	1,55	—	2,85	—	—	—	0,05	—
5	23,1	68,2	1,20	2,59	—	4,74	—	0,02	—	0,08	—
6	23,0	64,5	1,13	3,90	—	7,14	—	0,16	—	0,12	—
7	22,7	59,2	1,04	5,67	0,03	10,4	—	0,73	—	0,18	—
Четырехкомпонентная исходная смесь: H ₂ + N ₂ O + O ₂ (N ₂) + воздух											
5	23,1	70,6	1,20	4,98	—	—	—	0,01	0,03	—	0,03
6	23,1	70,5	1,00	5,21	—	—	—	0,16	0,03	—	0,03
7	22,6	70,3	0,64	5,51	0,03	—	—	0,79	0,03	—	0,03

Примечание. Прочерк означает, что доля данного вещества меньше 0,01 % или оно отсутствует.

На рис. 4 линии 3, 4 представляют собой нижние пределы вынужденного воспламенения в воздухе водорода и пропана: 0,04, 0,0237 [8]. Видно, что при $M_H = 4 \div 6$ только водород может обеспечить воспламенение горючего в трехкомпонентной смеси. Доли пропана, необходимые для нагревания смеси от температуры $T_{\phi 1}(h) = 300$ К до $h_{\phi 1}(0) = h_{0H}$, значительно меньше их пределов воспламенения. Поэтому для воспроизводства натурной энтальпии при $M_H = 4 \div 6$ трехкомпонентные смеси, содержащие пропан, использоваться не могут. Для условий полета с $M_H = 4 \div 6$ пропан можно использовать, если допустить $h_{\phi 1}(0) > h_{0H}$, т. е. допустить, что температура торможения потока, набегавшего на модели, будет выше натурной температуры торможения T_{0H} . Из рис. 4 следует, что, согласно условиям воспламенения смеси горючее — воздух, использование в качестве источника нагрева пропана возможно начиная с $M_H \approx 6,8 \div 6,9$ (при моделировании той траектории полета, которая рассматривается в данной работе — см. табл. 1).

Массовые доли водяного пара в составной смеси установки приведены в табл. 2. Переход от водорода к пропану позволяет существенно уменьшить содержание водяных паров. Однако

при этом в смеси появляется углекислый газ. Так, при $M_H = 7$ массовая доля CO₂ в смеси составляет для пропана ≈ 10 %. Заметим, что при $M_H = 4 \div 5$ массовая доля водяных паров даже при использовании в качестве горючего водорода невелика ($3 \div 5$ %). Эти цифры соответствуют естественному состоянию атмосферы на уровне земли при температуре выше ≈ 300 К и относительной влажности $80 \div 100$ %. Поэтому моделирование при $M_H = 4 \div 5$ состава смеси за счет сжигания водорода является обоснованным даже в задачах с достаточно строгими требованиями к составу рабочей смеси.

Работа установки на четырехкомпонентной смеси. Существенное уменьшение содержания водяного пара и углекислого газа возможно, если часть горючего заменить закисью азота N₂O [2]. Реакция разложения N₂O начинается при 770 К и полностью заканчивается при 1170 К [9]. Поэтому исходная смесь, содержащая N₂O, должна быть предварительно нагрета до такой промежуточной температуры T' , которая гарантировала бы дальнейшее полное разложение N₂O.

Соотношение горючего и закиси азота может выбираться исходя из нескольких соображений.

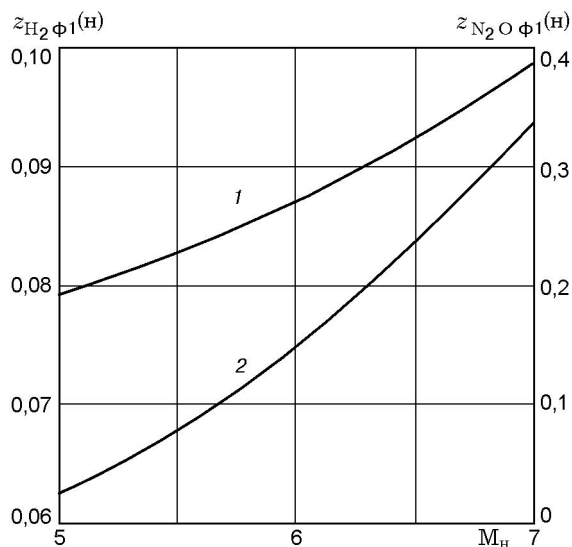


Рис. 5. Мольные доли водорода (1) и закиси азота (2) в четырехкомпонентной смеси водород + закись азота + воздух + кислород (азот)

1. Доля N_2O выбирается такой, чтобы образующегося при разложении кислорода полностью хватало и для сгорания горючего, и для доведения массовой доли кислорода в смеси до 0,231. В этом случае в состав исходной смеси не надо добавлять компенсирующего кислорода или азота, а накачиваемая в первую форкамеру исходная смесь будет, по существу, трехкомпонентной: горючее + закись азота + воздух. При этом необходимо следить, чтобы после сгорания горючего в воздухе (или какой-то доли горючего в воздухе) температура была выше температуры начала разложения N_2O .

2. Доля N_2O выбирается такой, чтобы в рабочей смеси массовые доли H_2O , CO_2 не превышали наперед заданных величин, определяемых требованиями задачи. В предельном случае исходная смесь может состоять только из закиси азота и компенсирующего азота. Тогда рабочая смесь будет представлять собой чистый воздух (с точностью до $\approx 1\%$ аргона, который содержится в атмосферном воздухе и которого не будет в смеси). Однако при этом необходим нагрев исходной смеси до температуры начала разложения N_2O за счет внешнего по отношению к исходной смеси источника.

3. Соотношение горючего и закиси азота выбирается произвольным исходя из технико-экономического обоснования исследований.

4. Доля горючего выбирается такой, что-

бы при его сгорании за счет кислорода воздуха температура исходной смеси достигала значений, гарантирующих полное разложение N_2O . В настоящей работе рассматривается именно такой случай. При этом в качестве промежуточной температуры, до которой исходная смесь нагревается за счет сжигания горючего, выбрана температура $T' = 1100$ К, гарантирующая начало разложения N_2O . Повышение температуры от 1100 К до температуры полного разложения N_2O , равной ≈ 1170 К, будет идти за счет теплоты разложения N_2O . Число M_H , начиная с которого может применяться N_2O , ограничено соотношением $T' = T_{0H} = 1100$ К, что соответствует $M_H = 4,7$. Поэтому на рис. 5, 6 ось M_H начинается с $M_H = 5$.

На рис. 5 приведены мольные доли водорода, необходимые для нагрева исходной четырехкомпонентной смеси от температуры $T_{см.\phi 1(n)} = 300$ К до температуры $T' = 1100$ К. Для диапазона $M_H = 5 \div 7$ мольные доли водорода лежат выше нижнего предела вынужденного воспламенения водорода в воздухе, равного 0,04 [8]. Таким образом, четырехкомпонентная смесь с водородом в качестве горючего может быть использована для нагрева рабочей смеси во всем диапазоне числа Маха $M_H = 4,7 \div 7$. В то же время при использовании в качестве горючего пропана необходимые мольные доли пропана составляют 0,013 даже для $M_H = 7$. Нижний предел вынужденного воспламенения пропана равен 0,0237 [8]. То есть применение пропана в сочетании с N_2O для $M_H \leq 7$ без принятия специальных мер по его воспламенению и сгоранию невозможно, так как не обеспечивается требованием вынужденного воспламенения.

Существенное уменьшение массовой доли водяного пара в составе, полученном при применении четырехкомпонентной исходной смеси с водородом в качестве горючего, по сравнению со случаем использования трехкомпонентной исходной смеси видно из табл. 2. Так, например, при $M_H = 7$ массовая доля водяного пара уменьшается более чем в два раза: с 12 до 5,5 %. В этом и заключается основное преимущество применения четырехкомпонентной исходной смеси с закисью азота.

С увеличением числа Маха от $M_H = 4,7$ уменьшается количество компенсирующего кислорода, который добавляется в исходную смесь, чтобы выдержать в рабочей смеси массовую долю кислорода $g_{O_2} = 0,231$ (рис. 6). При

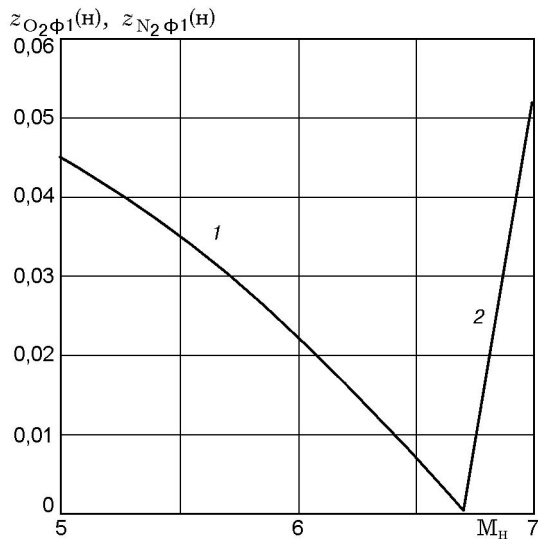


Рис. 6. Мольные доли кислорода (1) и азота (2) в четырехкомпонентной смеси водород + закись азота + воздух + кислород (азот)

$M_H \approx 6,7$ уже не требуется добавлять кислород в исходную смесь и четырехкомпонентная смесь превращается, по существу, в трехкомпонентную: кислород, необходимый для компенсации количества, затраченного при сгорании водорода, образуется за счет разложения закиси азота. При дальнейшем увеличении числа Маха от $M_H = 6,7$ количество N_2O в исходной смеси увеличивается (см. рис. 6) и разложение закиси азота будет приводить к избытку кислорода в рабочей смеси, сверх $g_{O_2} = 0,231$. Чтобы сохранить значение $g_{O_2} = 0,231$, в исходную смесь, накачиваемую в первую форкамеру, начиная с $M_H = 6,7$ вместо кислорода добавляется азот.

Время режима. При моделировании параметров M_H и H время режима τ установки с двойной форкамерой (см. рис. 1) при заданных объеме форкамеры $V_{\phi 1}$ и диаметре среза сопла d_c зависит от давлений в первой ($p_{\phi 1}$) и второй ($p_{\phi 2} = p_{0H}$) форкамерах, так как значение $M_c = M_H$ определяет площадь критического сечения сопла $F_{кр}$, а отношение $p_{\phi 1}/p_{\phi 2}$ — площадь дроселирующего отверстия F_{1-2} между форкамерами.

В качестве примера на рис. 7 приведено время режима τ при постоянном в течение режима давлении в первой форкамере $p_{\phi 1}(\tau) = p_{\phi 1}(0)$ (т. е. когда рабочая смесь вытесняется из форкамеры поршнем 3, см. рис. 1) для

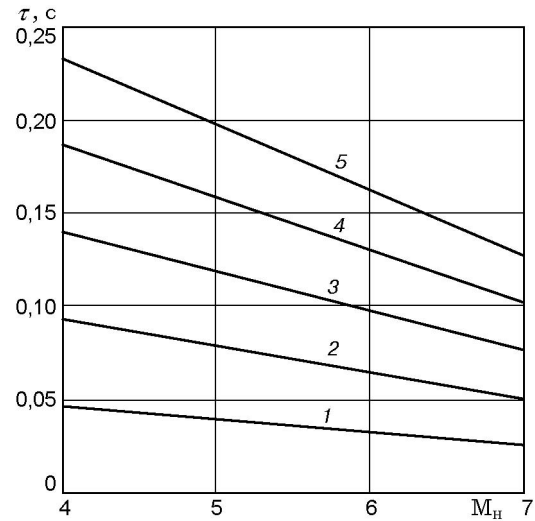


Рис. 7. Время истечения из первой форкамеры (время режима τ) при использовании в качестве горючего водорода:

$p_{\phi 1}(0)$ после подвода тепла, бар: 1 — 200; 2 — 400; 3 — 600; 4 — 800; 5 — 1000

$V_{\phi 1} = 50 \text{ дм}^3$ и $d_c = 1 \text{ м}$. Данные получены для трехкомпонентной смеси с водородом в качестве горючего. Для других горючих и для четырехкомпонентных смесей время режима отличается от приведенных на рис. 7 не более чем на 2 %, так как свойства смесей при всех использованных для нагрева веществах близки. Это объясняется тем, что требовались бедные смеси и, по существу, состав рабочей смеси для всех рассмотренных исходных веществ, накачиваемых в первую форкамеру, близок к воздуху (см. табл. 2, в которой приведены массовые доли индивидуальных веществ в первой форкамере после завершения химической реакции). Содержание не упомянутых в таблице веществ, из тех которые учитывались в расчетах, меньше 0,01 %.

Из рис. 7 видно, что с увеличением M_H время режима при $V_{\phi 1} = \text{const}$, $d_c = \text{const}$ уменьшается. Это связано с тем, что для траектории с постоянным скоростным напором давление торможения воздуха p_{0H} с ростом M_H увеличивается быстрее, чем уменьшается площадь критического сечения сопла. Поэтому увеличивается площадь отверстия F_{1-2} между двумя форкамерами, которая и определяет длительность режима. Это приводит к уменьшению времени истечения рабочей смеси из форкамеры.

Время режима существенно растет с уве-

личением давления в первой форкамере. Так, увеличение $p_{\phi 1}$ с 200 до 1000 бар приводит к увеличению τ в ≈ 5 раз. Именно этот факт, связанный с применением двойной форкамеры, когда давление $p_{\phi 1}$ может быть много больше требуемого для моделирования значения $p_{0н}$, в сочетании с химическим подогревом и позволяет обеспечить энергетику высокоэнтальпийных установок кратковременного режима типа ИТ-302М (а следовательно, время режима и размеры моделей), приемлемую для исследования газодинамических моделей с горением при $M_c = 4 \div 5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баев В. К., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Некоторые методические аспекты исследования газодинамических моделей с тепло-массоподводом в импульсной аэродинамической трубе // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 45–54.
2. Шумский В. В. Использование в высокоэнтальпийных установках химического подогрева и адиабатического сжатия для расширения диапазона исследования газодинамических моделей с горением // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1990. Вып. 5. С. 149–157.
3. Таблицы стандартной атмосферы. ГОСТ 4401-64. М., 1964.
4. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
5. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П., Худяков В. А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник: В 9 т. Т. 1: Методы расчета. М.: ВИНТИ, 1971.
6. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник / Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука, 1978 (т. 1, кн. 2), 1979 (т. 2, кн. 2).
7. Щетинков Е. С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
8. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.
9. Краткая химическая энциклопедия. Т. 1. М.: Сов. энцикл., 1961.

Поступила в редакцию 23/VII 2002 г.
