

УДК 627.036.46: 536.45: 536.46

Сжигание в форкамере импульсной трубы оксида углерода для образования рабочего тела CO_2 *

В.В. Шумский¹, М.И. Ярославцев^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: shumsky@itam.nsc.ru, yaroslav@itam.nsc.ru

Рассматривается способ образования и нагрева в форкамере импульсной трубы в качестве рабочего тела углекислого газа CO_2 . Для образования и нагрева CO_2 форкамера наполняется исходной смесью газов CO , O_2 , CO_2 , между которыми в форкамере после инициирования происходит экзотермическая химическая реакция в соответствии с формулой $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2 = (1+x)\text{CO}_2$. Концентрации оксида углерода CO и кислорода находятся в стехиометрическом соотношении. Варьирование числом молей x балластного CO_2 в левой части химической формулы позволяет в широких пределах изменять температуру образующегося рабочего тела. Опытами в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН показано, что рост давления в форкамере в изохорном процессе за счет совместного подвода тепла, выделяющегося в результате реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2$ и электрического разряда, соответствует полноте сгорания CO , практически равной единице. Время завершения реакции при инициировании ее электрической дугой составляет не более нескольких миллисекунд.

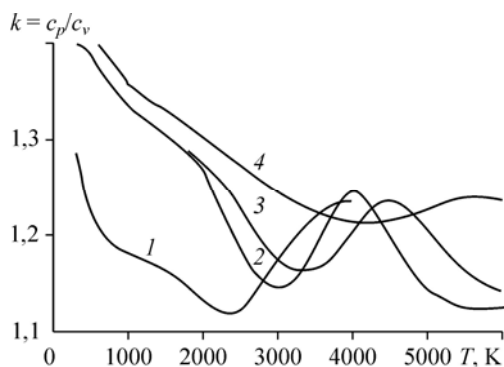
Ключевые слова: импульсная аэродинамическая труба, форкамера, рабочее тело, оксид углерода, углекислый газ.

С целью расширения возможностей высокоэнтальпийных установок кратковременного действия рассматривается использование в них углекислого газа CO_2 в качестве рабочего тела [1, 2]. Необходимость практического применения CO_2 возникает в ряде задач:

- при исследовании тонких физических процессов при обтекании тел высокотемпературным гиперзвуковым потоком газа, состоящим из трехатомных молекул CO_2 ;
- при исследовании аэродинамических характеристик аппаратов, осуществляющих полет над поверхностью Венеры и Марса, поскольку атмосфера этих планет состоит в основном из углекислого газа;
- для моделирования отношения удельных теплоемкостей $k = c_p/c_v$ воздуха при температуре $T > 4000$ К рабочим телом с умеренными значениями T .

В качестве иллюстрации последнего случая на рис. 1 приведены k для воздуха и CO_2 . Видно, что величины $k = 1,15$ – $1,25$ для воздуха при $T > 3500$ К равны значениям k для CO_2

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта Правительства РФ (договор № 14.Z50.31.0019) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Рис. 1. Показатель адиабаты CO_2 и воздуха.

1 — CO_2 , $p = 1$ бар [3]; 2–4 — воздух [4], $p = 0,1$ (2), 1 (3), 100 (4) бар.

при $T = 500\text{--}2000$ К, что позволяет в задачах, где определяющим параметром является k , проводить исследования при существенно более низких температурах с целью уменьшения тепловых нагрузок на модели и конструкцию установки. Однако при использовании CO_2 в качестве рабочего тела гиперзвуковой импульсной трубы

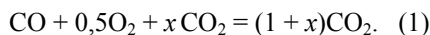
ИТ-302М ИТПМ СО РАН были обнаружены проблемы, связанные с электроотрицательностью CO_2 , что затрудняло образование дуги при разряде конденсаторной батареи установки: в ряде опытов наблюдалось большое остаточное напряжение на конденсаторах (до 2 кВ при максимально возможных значениях напряжения на конденсаторной батарее $U \sim 5$ кВ). При уменьшении давления в форкамере (ФК) в процессе истечения CO_2 конденсаторная батарея повторно разряжалась, сбрасывая остаточное напряжение, что приводило к нештатной работе установки. Кроме того, для реализации высокотемпературных режимов при нагреве CO_2 ($T > 2000$ К) в форкамере объемом ~ 10 дм³ только за счет электродугового разряда накопленной энергии батареи было недостаточно даже при напряжении 5 кВ.

Другой проблемой является повышенное загрязнение рабочего газа продуктами эрозии электродов при вкладах электрической энергии, близких к максимальным. Загрязнение рабочего газа затрудняет применение оптических методов для исследования физических процессов при обтекании моделей гиперзвуковым потоком. Например, исключается применение тепловизионных систем для определения температуры поверхности моделей, так как сплошной фон от нагретых частиц не позволяет выделять излучение от нагретых участков модели.

В связи с вышеизложенным рассматривалась возможность нагрева CO_2 в форкамере установки ИТ-302М не только за счет электрической дуги, но была проанализирована вероятность образования и нагрева CO_2 одновременно за счет электрической дуги и экзотермической химической реакции сгорания оксида углерода СО в среде кислорода O_2 .

На рис. 2 приведена часть газодинамического тракта ИТ-302М, состоящая из первой ФК 1, второй ФК 2, сопла 3. Из сопла рабочее тело попадает в рабочую часть и далее в вакуумную емкость установки. Между первой и второй ФК находилась дросселирующая решетка 4, которая служила критическим сечением для рабочего тела, истекающего из первой ФК. Перед решеткой находился диафрагменный узел, управляющий вскрытием диафрагмы 5.

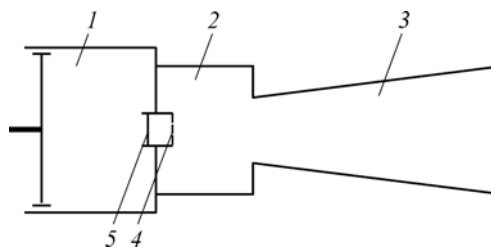
Для образования и нагрева CO_2 первая ФК наполняется исходной смесью газов СО, O_2 , CO_2 , между которыми в ФК после инициирования происходит реакция в соответствии с формулой



В реакции (1) x — число молей углекислого газа, который вводится в реакцию

Рис. 2. Генераторная часть газодинамического тракта ИТ-302М.

1 — первая ФК, 2 — вторая ФК, 3 — сопло, 4 — дросселирующая решетка между ФК, 5 — диафрагма управляемого диафрагменного узла.



в качестве балласта: варьирование в исходной смеси величины x позволяет изменять температуру образующегося рабочего тела.

На рис. 3 и 4 приведены давление и температура рабочего тела, образующегося в изохорном процессе в результате реакции (1) при различных значениях давления $p_{\text{chl}}(p)$, с которым первая ФК наполняется исходной смесью. В расчетах использовались следующие предположения.

1. Вклад электрической энергии отсутствует (конденсаторная батарея не заряжается и подвода теплоты за счет электрической дуги не происходит, $Q_{\text{el}} = 0$), а инициирование реакции производится источником с энергией много меньшей теплового эффекта реакции (1).

2. Полнота сгорания CO равна единице.

3. Для каждой пары $p_{\text{chl}}(0)$ и $T_{\text{chl}}(0)$ рабочее тело (продукты реакции) находится в химически равновесном состоянии с учетом зависимостей для индивидуальных веществ внутренних степеней свободы от температуры, а диссоциации — от температуры и давления, но без учета межмолекулярных взаимодействий.

4. В исходной смеси концентрации оксида углерода и кислорода находятся в стехиометрическом соотношении.

5. Температура смеси до реакции $T_{\text{chl}}(p) = 293$ К.

Индекс 0 в скобках относится к началу режима ($t = 0$), за начало режима на рис. 3 и 4 принимается завершение подвода тепла в ФК в результате реакции (1). Индекс “p” в скобках относится к параметрам наполнения исходной смеси в ФК до реакции, нижний индекс chl относится к первой ФК.

Из анализа рис. 3 и 4 следуют следующие выводы. При уменьшении x от $x \approx 1,5$ температура продуктов реакции начинает заметно расслаиваться по давлению и при $x = 0$ достигает максимальных значений: $T_{\text{chl}}(0) = 3720\text{--}4100$ К (для $p_{\text{chl}}(0) = 100\text{--}1000$ бар соответственно). Для $x = 0$ разница в 380 градусов в зависимости от давления связана с диссоциацией CO_2 : при $p_{\text{chl}}(0) = 100$ бар ($p_{\text{chl}}(p) = 10$ бар, $T_{\text{chl}}(0) = 3720$ К) массовая доля CO_2 в продуктах реакции составляет $g_{\text{CO}_2} = 0,59$ (остальное CO, O_2 , O), а при $p_{\text{chl}}(0) = 1000$ бар ($p_{\text{chl}}(p) = 90$ бар, $T_{\text{chl}}(0) = 4100$ К) $g_{\text{CO}_2} = 0,66$. Сказывается известный факт, что давление подавляет диссоциацию. При $x = 1,5$ $T_{\text{chl}}(0) = 2510\text{--}2570$ К для диапазона $p_{\text{chl}}(p) = 10\text{--}90$ бар ($p_{\text{chl}}(0) = 73\text{--}670$ бар (см. рис. 3), при этом g_{CO_2} изменяется от 0,975 до 0,99 соответственно). Расчеты показывают, что для $T_{\text{chl}}(0) = 2400$ К ($x \approx 1,7$) $g_{\text{CO}_2} > 0,995$ для всех рассмотренных $p_{\text{chl}}(p)$, то есть температура продуктов реакции не зависит от давления и кривые 1–5 на рис. 4 совпали бы, поэтому температуру 2500–2400 К ($x = 1,5\text{--}1,7$) практически можно принять за границу расслоения по давлению кривых $T_{\text{chl}}(0) = f_1(p_{\text{chl}}(p)) = f_2(p_{\text{chl}}(0))$.

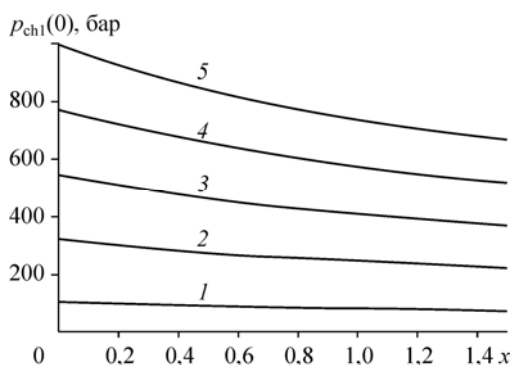


Рис. 3. Давление в ФК после реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2$.

$p_{\text{chl}}(p) = 10$ (1), 30 (2), 50 (3), 70 (4), 90 (5) бар.

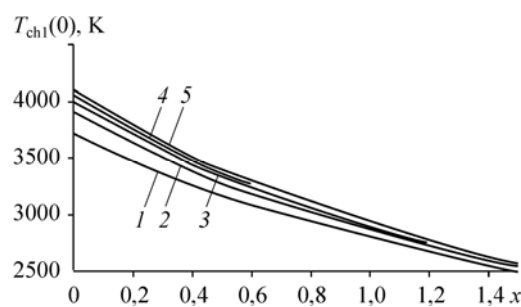
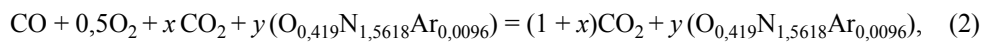


Рис. 4. Температура в ФК после реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2$.

Обозначения см. на рис. 3.

Изменение параметра x позволяет регулировать температуру образующегося рабочего тела. Для рассматриваемого диапазона давлений и температур изменение $p_{ch1}(0)$ определяется в основном не параметром x (хотя и зависит от него), а давлением $p_{ch1}(p)$, с которым первая ФК наполняется исходной смесью (см. рис. 3). Таким образом, изменением параметров x и $p_{ch1}(p)$ в результате реакции (1) обеспечивается получение рабочего тела, состоящего в основном из CO_2 , в широком диапазоне давлений и температур: $T_{ch1}(0)$ до 4000 К, $p_{ch1}(0)$ до 1000 бар.

В импульсной трубе ИТ-302М для $p_{ch1}(p) = 21$ бар и напряжения зарядки конденсаторной батареи $U = 2,5$ кВ ($Q_{el} = 250$ кДж) были проведены эксперименты при $x = 0,4, 0,6, 0,88$ с иницированием реакции дугой, возникающей при разряде конденсаторной батареи. При этом в отличие от реакции (1), которая использовалась для анализа условий образования и нагрева углекислого газа за счет применения CO , в опытах, проводимых в ИТ-302М, состав исходной смеси в ФК до реакции содержал воздух: перед вводом CO, O_2, CO_2 в первую ФК в ней уже находится атмосферный воздух при давлении 1 бар. Поэтому вместо (1) формула реакции для анализа результатов опытов записывается как



здесь y — количество молей атмосферного воздуха, эквивалентная формула которого $O_{0,419}N_{1,5618}Ar_{0,0096}$ соответствует чистому сухому воздуху. Величина y определяется тем обстоятельством, что во всех рассматриваемых здесь опытах мольная доля воздуха $r_{air} = 1/21$ и $y = r_{air} M$, где M — число молей в реакции (2). Для реакции (2) (при 1 моле CO и задаваемой величине x) значение M определяется как $M = (1 + 0,5 + x) / (1 - r_{air})$.

Одной из целей экспериментов было определение полноты сгорания CO , по возможности в чистом виде, то есть определение вклада химической энергии в энергетику установки при зажигании от электрической дуги. Это требовало наличия в опытах минимально возможного предварительного нагрева исходной смеси за счет электрического разряда, то есть определение вклада химической энергии должно происходить при минимально возможном значении Q_{el} . Минимальное напряжение зарядки конденсаторной батареи U , дающее стабильно устойчивый разряд в ФК установки, составляло 2,5 кВ. Оно и определяло в опытах величину $Q_{el} \approx 250$ кДж.

В импульсных трубах с подводом тепла только за счет электрической дуги вскрытие диафрагмы происходит автоматически за счет потери прочности при многократном нарастании давления в ФК в изохорном процессе, при этом считается, что изохорный процесс подвода тепла и разрушение диафрагмы практически происходят мгновенно и совпадают. Для подвода тепла только за счет электрического разряда это оправдано, так как длительность разряда меньше миллисекунды и отклонение на первых миллисекундах от вертикали кривой $p_{ch1}(t)$ и ее колебания обычно объясняются инерционностью измерительного канала и его успокоением. При наличии химической реакции вскрытие диафрагмы необходимо задерживать до завершения в объеме ФК всех стадий реакций. В настоящих опытах использовалась система задержки (управляемая диафрагма), изложенная в работах [5, 6].

На рис. 5 приведена типичная зависимость давления в первой ФК от времени t . За время $t = 0$ здесь принято начало электрического разряда, который служит средством иницирования химической реакции (этот момент практически совпадает с моментом начала роста давления в ФК), l — давление наполнения $p_{ch1}(p) = 21$ бар в ФК исходной смеси, состоящей из $CO, O_2, CO_2, \text{воздуха}$. В данном опыте задержка вскрытия диафрагмы составляла ~ 25 мс, момент вскрытия диафрагмы обозначен стрелкой 2. После вскрытия диафрагмы начинается истечение рабочего тела из первой ФК с темпом падения давления, определяемом площадью отверстий в дросселирующей решетке 4 (рис. 2).

В работах [5, 7] при исследовании нагрева рабочего тела за счет сгорания в ФК смесей водорода или пропана с воздухом время завершения химической реакции оценивалось по кривой давления $p_{ch1}(t)$ на участке от $t = 0$ до момента вскрытия диафрагмы.

Рис. 5. Давление в ФК в зависимости от времени режима.

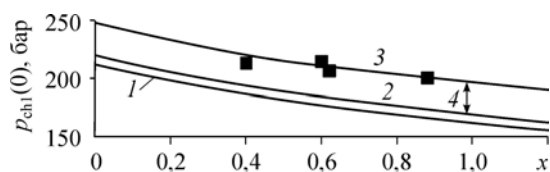
$x = 0,88, y = 0,119;$
 1 — $p_{\text{chl}}(p)$, 2 — вскрытие диафрагмы.

Моментом достижения максимального давления на этом участке считался момент завершения химической реакции t_{chim} . Когда концентрация водорода или пропана в трехкомпонентной смеси (горючее + + кислород + воздух) находилась в районе нижней концентрационной границы воспламенения при нормальных условиях, время реакции t_{chim} составляло

30–40 мс, при приближении к стехиометрическому составу оно уменьшалось до нескольких миллисекунд. Одновременно с опытами по совместному подводу тепла за счет электрической энергии и химических реакций в работах [5, 7] проводились опыты на чистом воздухе при вкладе в ФК только электрической энергии, примерно равной энергии $Q_{\text{el}} + Q_{\text{chim}}$ для опытов с горючим. Здесь Q_{chim} — количество тепла, выделяющегося за счет химической реакции. Темпы падения давления за счет отвода тепла к стенкам ФК как в опытах на чистом воздухе, так и опытах с горючим (начиная с максимума на кривых $p_{\text{chl}}(t)$ для опытов с горючим) практически повторяют друг друга. Это свидетельствует о том, что химическая реакция в основном заканчивается к моменту достижения максимума на кривых $p_{\text{chl}}(t)$, что и позволяет считать этот максимум временем завершения химической реакции в ФК.

Настоящие опыты с СО проводились при стехиометрическом соотношении исходной смеси $\text{CO} + \text{O}_2$. Из кривой $p_{\text{chl}}(t)$ рис. 5 видно, что после нескольких миллисекунд от начала электрического разряда начинается падение давления в ФК. Причем темп падения давления соответствует отмеченному в работах [5, 7] темпу падения давления из-за отвода тепла в стенки ФК для чистого воздуха. Это позволяет считать, что время сгорания t_{chim} оксида углерода составляло несколько миллисекунд и выбранная задержка вскрытия диафрагмы ~ 25 мс значительно больше t_{chim} , что позволяет полностью завершить сгорание СО.

На рис. 6 и 7 приведены расчетные значения давления $p_{\text{chl}}(0)$ и температуры $T_{\text{chl}}(0)$ после завершения в изохорном процессе реакции окисления окиси углерода для указанных выше условий испытания в ИТ-302М с исходным составом, соответствующим реакции (2) (см. кривые 2 и 3 при тех же предположениях, что использовались при расчетах кривых на рис. 3, 4). Кривая 1 относится к случаю, когда состав исходной смеси выражается соотношением $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2$ при давлении $p_{\text{chl}}(p) = 20$ бар. Разница в $p_{\text{chl}}(p)$ для кривых 2 и 1 объясняется тем, что в экспериментах перед вводом в ФК исходного состава в ней уже содержится атмосферный воздух с давлением 1 бар. Для сравнения реакций (1) и (2) необходимо, чтобы масса СО в них была одинаковой (следовательно, была бы одинаковой и теплота от сгорания СО), что и определяло большее на 1 бар значение $p_{\text{chl}}(p)$ для кривых 2 и 3 по сравнению с кривой 1. Кривые 1, 2 соответствуют случаю без вклада электрической энергии ($Q_{\text{el}} = 0$), кривая 3 — $Q_{\text{el}} = 250$ кДж.

Рис. 6. Давление в ФК в зависимости от мольной доли x углекислого газа.

Смеси, наполняющие ФК: 1 — $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2, p_{\text{chl}}(p) = 20$ бар, $Q_{\text{el}} = 0$; 2, 3 — $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2 + y(\text{O}_{0,419} \text{N}_{1,5618} \text{Ar}_{0,0096}), p_{\text{chl}}(p) = 21$ бар, $Q_{\text{el}} = 0$ (2), $Q_{\text{el}} = 250$ (3) кДж, 4 — увеличение параметров РТ в ФК за счет разряда конденсаторной батареи с $Q_{\text{el}} = 250$ кДж.

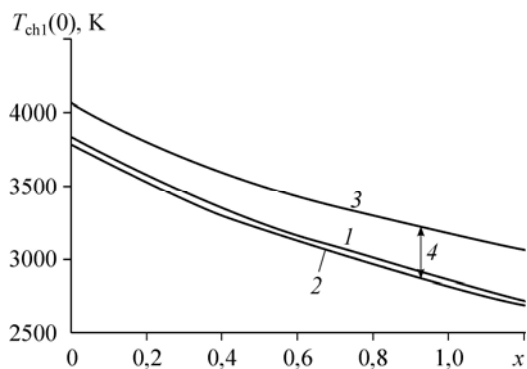


Рис. 7. Температура в ФК в зависимости от мольной доли x углекислого газа. Обозначения см. на рис. 6.

На рис. 6 кривая 2 лежит выше кривой 1, поскольку начальное давление смеси перед реакцией для кривой 2 выше, чем у кривой 1. В тоже время воздух является балластом, забирающим для своего нагрева часть тепла, выделяющегося при сгорании CO . Поэтому на рис. 7 кривая 2 лежит ниже кривой 1. Стрелка 4 показывает увеличение параметров рабочего тела в ФК за счет того, что к теплу, выделяющемуся при сгорании CO , добавляется тепло Q_{el} за счет разряда конденсаторной батареи.

Результаты измерения давления $p_{ch1}(0)$ в ФК изображены на рис. 6 символами. Видно, что результаты измерений хорошо совпадают с кривой 3. Поскольку расчетная кривая 3 получена при полноте сгорания, равной единице, то при сравнении результатов измерений с кривой 3 можно сделать вывод, что для указанных условий испытаний рост давления от $p_{ch1}(p) = 21$ бар в ФК в изохорном процессе за счет совместного подвода тепла, выделяющегося в результате реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2$, и электрического разряда соответствует полноте сгорания CO , практически равной единице.

Выводы

1. Рассмотрена возможность образования и нагрева углекислого газа в качестве рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима за счет электрической дуги и экзотермической химической реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + x\text{CO}_2$. Показано, что предложенный способ получения CO_2 в качестве рабочего тела обеспечивает получение температуры рабочего тела до 4000 К. Изменение в исходной смеси содержания CO_2 , служащего балластом, позволяет в широких пределах регулировать температуру образующегося CO_2 за счет изменения x .

2. Результаты испытаний в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М при $p_{ch1}(p) = 21$ бар (из которых 1 бар приходится на давление воздуха), напряжении зарядки конденсаторной батареи 2,5 кВ ($Q_{el} = 250$ кДж) и $x = 0,4, 0,6, 0,88$ показали, что рост давления от $p_{ch1}(p) = 21$ бар в форкамере в изохорном процессе за счет совместного подвода тепла, выделяющегося в результате реакции $\text{CO} + 0,5\text{O}_2$ и электрического разряда, соответствует полноте сгорания CO , практически равной единице. Время завершения реакции при иницировании ее электрической дугой составляет не более нескольких миллисекунд.

Список литературы

1. Королев А.С. Получение и исследование в импульсной аэродинамической трубе гиперзвуковых течений углекислого газа // Тр. ЦАГИ. Вып. 1643. 1975. 8 с.
2. Боровой В.Я., Бражко В.Н., Егоров И.В., Зайцев Е.Г., Скуратов А.С. Диагностика и численное моделирование течения в гиперзвуковых аэродинамических трубах импульсного действия // Уч. зап. ЦАГИ. Т. XLIV, № 5. 2013. С. 28–38.
3. Здункевич М.Д., Терехов В.А. Таблицы термодинамических и газодинамических функций углекислого газа при высоких температурах // Тр. ЦАГИ. Вып. 1309. 1970. 32 с.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
5. Shumskii V.V., Yaroslavtsev M.I. System of forced diaphragm breakdown // XV Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, 1-6 November 2010, Novosibirsk, Russia. Abstr. Part II. 2010. P. 230–231.
6. Маслов А.А., Шумский В.В., Ярославцев М.И. Высокоэнтальпийная установка кратковременного действия с комбинированным нагревом и стабилизацией параметров // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 5. С. 535–546.
7. Шумский В.В., Ярославцев М.И. Химический нагрев рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 5. С. 31–43.

Статья поступила в редакцию 30 января 2015 г.,
после доработки — 28 апреля 2015 г.