

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ НА ОКИСЛЕНИИ УГЛЕРОДА

А. С. Бирюков, А. С. Борейшо, В. М. Марченко, А. М. Прохоров

Численно исследуются энергетические характеристики CO_2 -ГДЛ на смешении газовых потоков с донорным газом, получаемым в процессах газификации углерода, и с предварительным смешением, в которых газовая смесь является продуктом сгорания углерода (угля) в воздухе. Показано, что при использовании сотовых сопловых аппаратов удельные энергоъемы излучения ГДЛ обоих типов сравнимы и порядка 20 Дж/г.

1. Газодинамические лазеры на углекислом газе являются простым средством непосредственного преобразования тепловой энергии газа в мощное когерентное непрерывное излучение. Активная среда ГДЛ — это сверхзвуковой поток газовой смеси, в котором инверсия населенности создается и поддерживается накачкой уровней 00^01 молекул CO_2 колебательно-возбужденными молекулами N_2 и релаксацией уровней 10^00 при столкновениях с примесными компонентами (например, молекулами H_2O). Колебательно-возбужденные донорные молекулы получают при адиабатически быстром охлаждении в сопловом аппарате азота или обогащенных им газовых смесях. Энергетическая эффективность CO_2 -ГДЛ определяется главным образом энергоемкостью резервуара донорных молекул N_2 , удельный энергозапас которого $E_4 = k\theta_4 / [M_4 (\exp(\theta_4/T_4) - 1)]$ зависит от колебательной температуры T_4 (k — постоянная Больцмана; θ_4 , M_4 — характеристическая температура и масса молекул N_2). В равновесных условиях при температурах $T = T_4 = \theta_4 = 3353$ К около половины молекул N_2 колебательно возбуждены, $E_4 = 575$ Дж/г и $\sim 10\%$ от тепловой энергии газа сосредоточено в колебательных степенях свободы.

Энергетический потенциал CO_2 -ГДЛ, их удельные энергетические характеристики определяются возможностями создания непрерывно действующих экономичных высокотемпературных газогенераторов азота и получения газовых смесей с оптимизированными по энергоъему химическим составом и термодинамическими параметрами, а также оптимальных по сохранению энергозапаса сопловых аппаратов, обеспечивающих режимы работы ГДЛ в смешительном и гомогенном вариантах.

В этом плане представляет практический интерес анализ энергетических возможностей CO_2 -ГДЛ с химическими газогенераторами, основанными на газификации [1, 2] и сжигании [3, 4] углерода обогащенными азотом окислителями, в простейшем случае воздухом.

2. Под газификацией понимается процесс химического реагирования с кислородсодержащими молекулами в условиях избытка углерода, в результате чего образуются горючие газы [5]. Газификация широко применяется в топливных энергосистемах и МГД генераторах электроэнергии [6].

Химические превращения при газификации могут быть описаны формулой

$$s_0 \text{C} + s_1 \text{O}_2 + s_2 \text{N}_a \text{O}_b + s_3 \text{N}_2 + s_4 \text{H}_2\text{O} + s_5 \text{CO}_2 = \text{III}' = s'_1 \text{N}_2 + s'_2 \text{CO} + s'_3 \text{H}_2, \quad (1)$$

где s_x — стехиометрические коэффициенты; a , b — параметры, характеризующие конкретный окислитель. Мольные доли компонентов находятся из соотношения

$$\gamma_x = s_x \sum_x s_x.$$

Из (1) видно, что газификация дает возможность коррекции химического состава продуктов сгорания (ПС) в сторону уменьшения концентрации релаксантов и наработки донорных молекул (в этом случае $s_2=0$). Температура продуктов газификации $T_{\text{пр}}$ определяется законом сохранения полной энтальпии

$$\sum_x s_x [c_{px}(T_x) T_x + Q_x] = \sum_{x'} s_{x'} [c_{px'}(T_{\text{пр}}) T_{\text{пр}} + Q_{x'}], \quad (2)$$

где c_{px} — молярная теплоемкость при постоянном давлении, Q_x — теплоты образования исходных компонентов и продуктов из простых соединений.

В непрерывном режиме можно считать равными $T_{\text{пр}}$ и температуру газификатора ввиду интенсивного теплообмена, а массу газификатора постоянной для обеспечения условия избытка углерода при подаче реагирующей доли. Установление стационарной $T_{\text{пр}}$ сопровождается в зависимости от соотношения между s_x , T_x , Q_x и $s_{x'}$, $T_{\text{пр}}$, $Q_{x'}$ разогревом или охлаждением газификатора относительно начальной температуры углерода.

Из (2) следует, что требование одновременного увеличения мольной доли азота и температуры в ПГ противоречиво, но преодолимо с использованием внешних тепловых источников для нагрева исходных компонентов. Полезно также использование экзотермических окислителей, например N_2O . Поскольку в ПГ концентрации молекул CO_2 и H_2O малы, то после пропускания через сопловой аппарат поток ПГ выполняет роль донорного газа. Инверсия населенностей уровней 00⁰1 и 10⁰0 молекул CO_2 может быть получена при их подмешивании вместе с релаксантами H_2O или He в поток ПГ газодинамическими средствами, обычно используемыми в ГДЛ на смешении потоков [7].

Наиболее экономичным является процесс газификации углерода воздухом. Результат вычисления $T_{\text{пр}}$ в зависимости от температуры вступающей в реакцию доли углерода T_C при температуре сухого воздуха $T_b=300$ К и в предположении завершенности реакций газификации представлен на рис. 1, 1. Температурные зависимости c_{px} , а также значения Q_x взяты из [8]. Величину $T_{\text{пр}}^0 \approx 1690$ К можно считать температурой установившегося процесса, ибо при начальной температуре газификатора $T_C < T_{\text{пр}}^0$ он нагревается, а при $T_C > T_{\text{пр}}^0$ охлаждается. Здесь же дана зависимость $T_{\text{пр}}^0 = T_C$ от температуры T_b вступающего в реакцию воздуха, нанесенной на неравномерную наклонную шкалу (рис. 1, 2). Видно, что, варьируя T_C и T_b , можно получать $T_{\text{пр}}$ в пределах 1.5—2.7 кК, причем зависимость $T_{\text{пр}}$ от T_b существенно более сильная, чем от T_C , что связано с малой теплоемкостью углерода. Таким образом, при вычислении энергетических характеристик непрерывных ГДЛ начальную температуру в форкамере следует полагать равной $T_{\text{пр}}^0$.

Необходимые для подмешивания в сопловом аппарате CO_2 и H_2O можно получить, окисляя СО при дожигании части потока ПГ воздухом, содержащим требуемую долю паров H_2O . В сопловом аппарате может рассматриваться схема течений, при которой в форкамерах донорного и подмешиваемого компонентов давления одинаковы, а температуры равны $T_{\text{пр}}^0$ и температуре сгорания $T_{\text{ис}}$ соответственно ($T_{\text{ис}}$ также находится из (2)).

3. Для вычисления энергетических характеристик использовалась модель CO_2 —ГДЛ на газификации углерода [1]. Полагалось, что при стехиометрических равновесных реакциях газификации химический состав ПГ варьируется в зависимости от исходных газов при температуре продуктов $T_{\text{пр}}^0$; теплотери в форкамере не учитывались.

Перспективные сопловые аппараты ГДЛ имеют сотовую конструкцию с миниатюрными осесимметричными соплами [7]. При давлении в форкамере выше 1 МПа и $T_{\text{пр}}=1.5 \div 3$ кК газовые смеси в области дозвукового течения находятся в термодинамическом равновесии. Температура в критическом сечении сопел $T_{\text{кр}}=2T_{\text{пр}}^0/(\gamma+1)$, где показатель адиабаты $\gamma = \sum_x \chi_x \gamma_x$; $\gamma_x(T)$ брались из [8]. Течение в сверхзвуковой области сопел описывается одномерными уравнениями сохранения неравновесной газодинамики.

Форма индивидуальных осесимметричных сопел определяется требованием максимального уровня замораживания колебательной энергии с учетом потерь

в погранслоях, при развороте и взаимодействии струй на выходе. Наименьшей длиной, а следовательно, максимальной степенью сохранения колебательной энергии обладают профилированные укороченные осесимметричные сопла с углом наклона образующей в выходном сечении $8-10^\circ$ [9]. Такие сопла в несколько раз короче плоских и приближительно вдвое копических, рассматриваемых в [10].

Важным требованием к сопловым аппаратам ГДЛ является оптимизация процесса смешения струй. Оценки, опыт разработки и исследования сопловых аппаратов, составленных из осесимметричных сопел, показывают, что быстрое смешение струй и высокую энергетическую эффективность удается обеспечить за счет уменьшения масштаба смешения (расстояния между осями струй), который не превышает $3-5$ мм [10-13].

Таким образом, заданием поступательной температуры на срезе сопел (~ 300 К) или степени расширения $F/F_{кр}$ определяются диаметр критического сечения и длина сопел. Очевидное условие минимизации площади донных областей определяет варианты компоновки соплового аппарата.

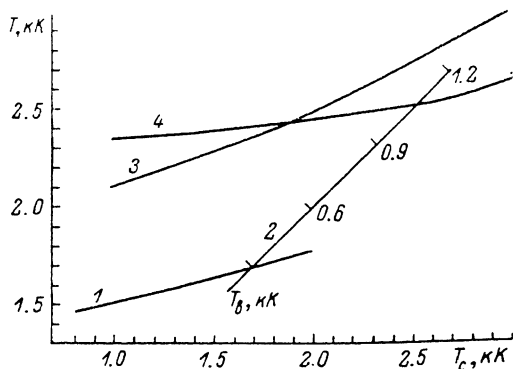


Рис. 1.

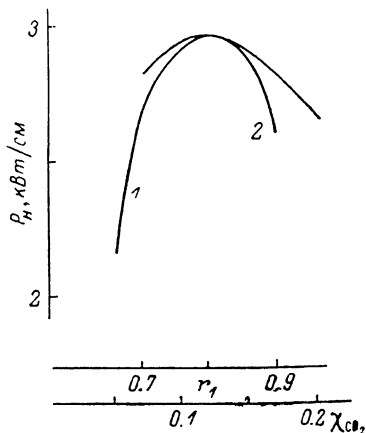


Рис. 2.

Взаимодействие потоков донорного и излучающего газов рассматривалось в модели мгновенного смешения, оправданность применения которой обсуждается в [7, 14]. В этой модели полагается, что в некотором поперечном сечении результирующего потока мгновенно выравниваются концентрации молекул каждого сорта, а газодинамические параметры определяются интегральными законами сохранения массы, импульса и энергии, записанными отдельно для взаимодействующих и результирующего потоков с учетом геометрии смешения [15]. При этом считается, что колебательные степени свободы при смешении не возмущаются. Газодинамические параметры потока и лазерные энергетические характеристики после смешения находятся из решения самосогласованной задачи релаксационной газодинамики в отсутствие химических превращений. Уравнения газодинамики и колебательной релаксации записывались в виде [16] в предположении наличия равновесия между симметричными и деформационными модами CO_2 . Решение замкнутой системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка велось методом Рунге—Кутты с равновесными граничными условиями, задаваемыми в критическом сечении. Поток активной среды характеризуется следующими вычисляемыми параметрами: продольное вдоль x распределение статического давления, поступательной T и колебательных $T_1 - T_5$ температур компонентов, показателя усиления α на колебательно-вращательных переходах P -ветви перехода $00^0 1 - 10^0$ молекул CO_2 в максимуме вращательной функции распределения, удельный энергозапас E и предельный КПД $\eta_{\text{max}} = E/H_0$, где H_0 — удельная энтальпия в форкамере. Лазерная энергетическая эффективность ГДЛ определялась с использованием условия стационарной генерации, т. е. равенства насыщенного показателя усиления пороговому. Длина L резонатора, образованного

плоскими зеркалами, коэффициенты их отражения r_1, r_2 и показатель нерезонансных потерь β задавались параметрически.

Вычислялись распределения интенсивности $J(x)$ в резонаторе в приближении геометрической оптики [17], мощность излучения P при заданных поперечных размерах зеркал с коэффициентом пропускания $t_1=1-r_1$, удельный энергосъем $W_L=P/G$ и удельный энергосъем $W_{L,c}$, нормированный на расход углерода, полный КПД $\eta=W_L/H_0$. Максимальная мощность излучения вычислялась при оптимальном коэффициенте связи резонатора, который находился варьированием r_1 .

Начальное давление в форкамере можно задать условием выхлопа потока в атмосферу через диффузор $P_0/P_{атм}=f(M)$ [18]. При числе Маха $M=6$ $P_0/P_{атм} \geq 30$. Профили донорных сопел оптимизируются из условия сохранения энергозапаса и считаются заданными. При фиксированных критическом

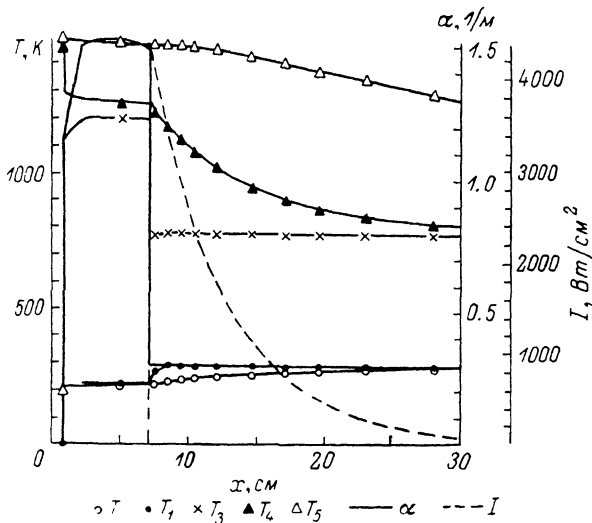


Рис. 3.

сечении, предельном угле раскрытия и длине степень расширения и профиль сопла для подмешиваемого газа подбираются из условия равенства давлений на срезе всех сопел, что ведет к снижению возмущений результирующего потока.

4. В расчетах были приняты следующие параметры донорных сопел: диаметр критики $d_{кр}=0.6$ мм, полуугол раскрытия $\theta/2=26.5^\circ$, длина $x_c=8.4$ мм, $F/F_{кр}=64$. В соплах подмешивания $d_{кр}=0.4$ мм, $\theta/2=25^\circ$, $x_c=8.4$ мм. Выравнивание давлений на срезе сопел достигалось при $F/F_{кр} \approx 80$. Резонатор с расстоянием между зеркалами $L=50$ см располагался в 6 см от среза сопел и имел протяженность 23 см вдоль потока. При этом считалось, что поток полностью заполняет резонатор. Коэффициент отражения глухого зеркала $r_2=0.98$, $\beta=0.05 \text{ м}^{-1}$. Газификация углерода воздухом при $T_p=300$ К рассчитывалась при установившейся стационарной температуре процесса, т. е. $T_{пг}^0=T_c=1690$ К. Мольная доля паров воды в результирующем потоке задавалась равной $\chi_{H_2O}=0.02$.

На рис. 2 приведен результат оптимизации погонной мощности излучения P_H , приходящейся на 1 см высоты потока, при варьировании мольной доли CO_2 в результирующем потоке χ_{CO_2} (1) и коэффициента отражения выходного зеркала r_1 (2). При $\chi_{\text{CO}_2}=0.12$, $\chi_{\text{CO}}=0.142$, $\chi_{\text{N}_2}=0.718$, $r_1=0.8$ и погонном расходе $G_H=260$ г/с·см достигается максимум $P_H \approx 2.7$ кВт/см. Удельный энергосъем также максимален $W_L=12$ Дж/г. Удельный энергозапас на входе в резонатор $E \approx 31$ Дж/г, полный КПД $\eta=0.65$ %. Распределение температур, интенсивности в резонаторе и показателя усиления в этом случае приведено на рис. 3. Как видно из рис. 4, I , с увеличением $P_{пг}$ до 10 МПа погонная мощ-

ность растет, но вследствие возрастающих релаксационных потерь удельные характеристики ГДЛ падают. Следует заметить, что используемая модель мгновенного смешения при больших P_{nr} дает лишь ориентировочный результат. Для количественного описания энергетических характеристик ГДЛ требуется детальный анализ процессов смешения при повышении статического давления в сверхзвуковом потоке. Влияние подогрева воздуха на энергетику ГДЛ иллюстрируется вариантами расчета при $T_n=900$ К, $\gamma_{CO_2}=0.1$, $T_{nr}^0=2320$ К. В диапазоне $P_{nr}=3\div 6$ МПа $P_H \approx 4\div 8$ кВт/см, $W_L=18\div 19$ Дж/г, $\eta=0.8$ %.

Так же как и для более низких T_{nr}^0 , на зависимости P_H от P_{nr} должен существовать оптимум, определяемый в основном двумя факторами: малой общей плотностью частиц при низких P_{nr} и большой скоростью колебательной релаксации при высоких. Для 900 К этот оптимум выше, чем для $T_n=300$ К, и кривая $P_H(P_{nr})$ при низких P_{nr} более крутая (рис. 4, 2).

Более высокую энергетику имеет процесс газификации углерода закисью азота. На рис. 1, 3 дана расчетная зависимость T_{nr} от температуры T_c . Темпера-

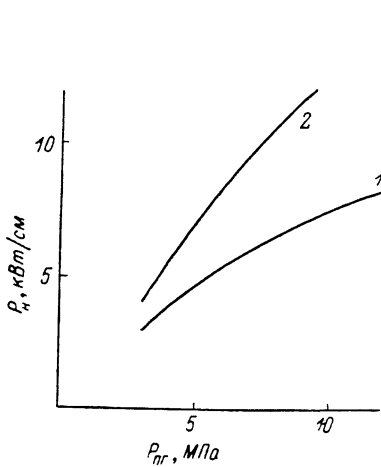


Рис. 4.

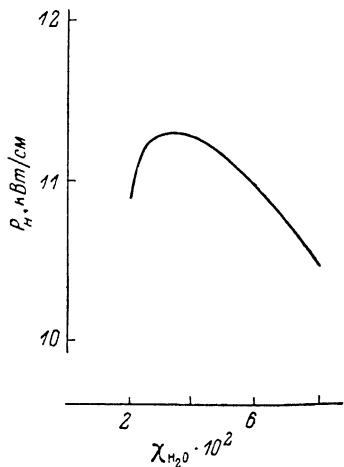


Рис. 5.

тура стационарного процесса $T_{nr}^0=T_c^0=3022$ К. Для того чтобы уменьшить перегрев потока при генерации температура на входе в резонатор не должна быть высокой, так что требуются большие степени расширения в соплах. Это ведет к слишком большому падению статического давления. Кроме того, условие быстрого смешения требует, чтобы сечение струй на срезе было как можно меньше. В связи с этим был рассчитан вариант $P_{nr}=9$ МПа, в обоих типах сопел положено $d_{sp}=0.4$ мм, $x_c=1$ см, $\theta/2=26.5^\circ$. В донорном сопле $F/F_{кр}=120$. Требование равенства давлений на срезе дает в сопле подмешивания $F/F_{кр}=190$. Химический состав результирующего потока $N_2 : CO : CO_2 : H_2O=55 : 31 : 12 : 2$. Параметры резонатора: $r_1=0.8$, $r_2=0.98$, $L=50$ см, $\beta=0.05$ м⁻¹. В таком потоке с $G_H=260$ г/с·см на входе в резонатор $E=104$ Дж/г. Параметры генерации: $P_H=7.45$ кВт/см, $W_L \approx 29$ Дж/г, $\eta \approx 1$ %.

Эталоном для сравнения может служить ГДЛ, в котором весь CO заменен на N₂ при тех же начальных условиях. Оптимизация этого ГДЛ по мольной доле H₂O (рис. 5) показала, что для максимального энергосъема она должна быть увеличена до 3–4 %. В этом случае $E=95$ Дж/г, $P_H=11$ кВт/см, $W_L=42$ Дж/г, $\eta=1.45$ %.

Из результатов следует, что ГДЛ на газификации углерода имеют лазерные энергетические характеристики примерно на треть ниже, чем в идеальном варианте, и связано это главным образом с разбавлением потока CO, который практически выполняет роль слабо выраженного донора.

Следует также отметить, что, несмотря на то что при газификации ПС топлив с большим содержанием CO₂, когда $T_{nr} < T_{nc}$, удельный энергосъём сверхзвукового потока сохраняется [1], однако удельный энергосъём ниже ввиду далеко неполного преобразования энергии, запасенной в CO, в излучение.

5. Уменьшение критических сечений сопел ГДЛ ведет к ускорению охлаждения потока и, следовательно, снижению релаксационных потерь. В [19] сообщается, что при $d_{кр} \leq 0.1$ мм эффективность ГДЛ с предварительным смещением компонентов становится сравнимой с ГДЛ на смешении потоков. Однако столь малые критические сечения сравнимы с толщиной погранслоя [17] и ведут к большим потерям. Поэтому представляет интерес оценка эффективности однородных ГДЛ с рассматриваемыми оптимизированными соплами, в которых нагретую газовую смесь получают при стехиометрическом сжигании углерода в воздухе при добавлении оптимальной доли паров воды. Реакция более полного окисления углерода кислородом экзотермичнее, чем газификация, $C + O_2 = CO_2 + 94.03$ кКал [20], т. е. ведет к нагреву смеси до более высоких температур (рис. 1, 4). Температура установившегося процесса $T_{гр}^0 = 2540$ К при $T_в = 300$ К. Подмешиванием паров H_2O обеспечивался химический состав потока $N_2 : CO_2 : H_2O = 77.8 : 19.2 : 3.0$. Для охлаждения ПС в соплах до $T_{ст} = 300$ К^{*} требуется $F/F_{кр} = 210$. В расчетах полагалось $d_{кр} = 0.4$ мм, $\theta/2 = 25^\circ$,

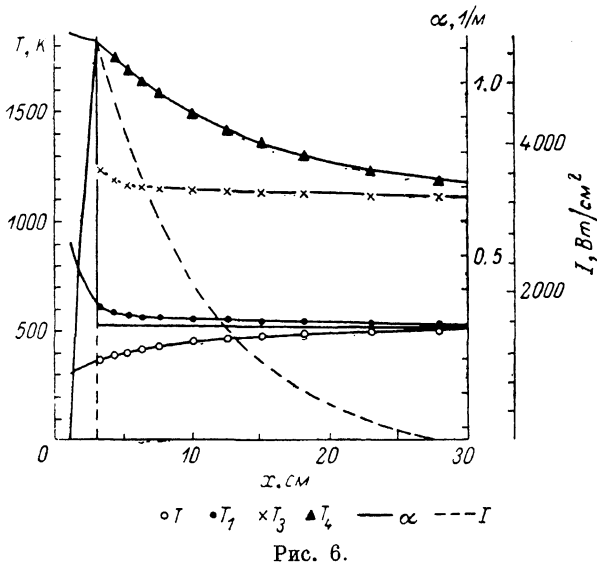


Рис. 6.

$x_0 = 1$ см. Резонатор располагался на расстоянии 2 см от среза сопел. Характерные энергетические параметры ГДЛ на сжигании углерода при $G_H = 190$ г/с·см: $E = 48$ Дж/г, $P_H = 4.3$ кВт/см, $W_L = 23$ Дж/г, $\eta = 0.75$ %.

Практический интерес представляет возможность использования в ГДЛ промышленного угля [3]. Согласно [21], в угле имеются примеси летучих углеводородов, кислорода, серы и минеральные добавки, выпадающие при окислении в виде золы. В предположении, что от запыленности, т. е. гетерогенной релаксации и поглощения можно избавиться, например, газодинамическими средствами, был рассчитан вариант однородного ГДЛ с условной формулой угля $C_8H_2O_{0.063}S_{0.031}$, примерно соответствующей антрациту [21]. Были учтены релаксационные процессы с участием колебательных мод SO_2 , их взаимодействие с модами молекул CO_2 , N_2 и CO . Константы скоростей соответствующих элементарных процессов брались из [22, 23], а недостающие выбирались такими, которые ведут к максимальному снижению полезного колебательного энергозапаса активной среды. Таким образом, оценивается нижняя граница энергетических характеристик ГДЛ на сжигании угля. Все начальные условия брались такими же, как при сжигании углерода. Химический состав ПС угля $N_2 : CO_2 : H_2O : SO_2 = 78 : 19.5 : 0.024 : 0.001$. Распределения температур, интенсивности излучения и показателя усиления вдоль потока показаны на рис. 6. Энергетические параметры при $G_H = 194$ г/с·см, $E = 42$ Дж/г, $P_H = 4.2$ кВт/см, $W_L = 21.7$ Дж/г, $\eta = 0.71$ % сравнимы с полученными при сжигании углерода. Эти результаты позволяют заключить, что сжигание малозольных промышленных углей может использоваться для создания активных сред ГДЛ. Темпера-

тура ПС углерода и угля позволяет достигать $W_L \approx 20$ Дж/г без дополнительного подогрева воздуха.

6. Проведенные исследования демонстрируют, что получение нагретых газовых смесей в реакциях окисления углерода ведет к достижению относительно высоких удельных энергетических характеристик CO_2 —ГДЛ простыми и экономичными средствами. В зависимости от технических требований, например температуры в форкамере, уровня используемой технологии окисления углерода и изготовления сопловых аппаратов, возможен выбор вариантов для экспериментальной реализации вплоть до использования промышленных углей. Варианты ГДЛ на смешении потоков имеют преимущество по удельным энергетическим характеристикам перед гомогенными при начальной температуре продуктов газификации выше 2.5 кК, для чего требуется предварительный подогрев воздуха на ~ 1 кК или использование экзотермических окислителей, например N_2O .

Ввиду того что молекулы СО выполняют роль слабо выраженного донора, следует стремиться к уменьшению их концентрации в потоке путем дожигания до CO_2 . Причем осуществление неравновесной реакции окисления СО в околокритической области сопел может привести к дополнительному увеличению энергетических характеристик, как об этом сообщалось в работах [24, 25], где измерялось усиление, и работах [26, 27], в которых была получена генерация. Подмешивание паров воды целесообразно вести в процессе дожигания, катализатором которого они являются [28], так как в подмешиваемом потоке их концентрация выше и легче контролируется. Возможно подмешивание и непосредственно в сверхзвуковой поток, что сопровождается снижением релаксационных потерь при течении в соплах.

Недостатком ГДЛ на газификации углерода является возможность повышения температуры в форкамере при режиме полного сгорания, например при прорыве газификатора, а также выхлоп токсичных газовых смесей, которые, впрочем, можно дожигать и использовать для подогрева воздуха. Выхлопные газы могут использоваться в газодинамических трактах МГД установок [6].

Достижение высоких энергетических параметров в гомогенных ГДЛ связано с осуществлением стехиометрического сжигания углерода, при отклонении от которого снижается температура продуктов сгорания. Одна из возможностей — это дожигание безводных продуктов газификации, т. е. СО [4], влажным воздухом, в котором молярная доля паров H_2O порядка 6—8 %. В выхлопных газах таких ГДЛ практически не содержится токсичных веществ.

Энергетической характеристикой, дающей оценку расхода топлива, является удельный энергоъем на единицу массы топлива. В рассматриваемом гомогенном ГДЛ эта величина порядка 300 Дж/г. Выхлопные газы могут использоваться в электроразрядных лазерах.

Литература

- [1] Бирюков А. С., Марченко В. М., Прохоров А. М. Квант. электр., 1985, т. 12, № 4, с. 683—688.
- [2] Бирюков А. С., Борейшо А. С., Захаров А. В. и др. Квант. электр., 1985, т. 12, № 10, с. 2158—2160.
- [3] Бирюков А. С., Шелепин Л. А. ЖТФ, 1970, т. 40, № 12, с. 2575—2577.
- [4] Pailay B. G., Zovko C. T. AIAA Paper, 1973, N 73—1233. 13 p.
- [5] Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердых топлив. М.: Изд. АН СССР, 1958. 730 с.
- [6] Тез. докл. VIII Междунар. конф. по МГД преобразованию энергии. М. 1983.
- [7] Солоухин Р. И., Фолин Н. А. Газодинамические лазеры на смешении. Минск: Наука и техника, 1984. 248 с.
- [8] Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1972. 200 с.
- [9] Борейшо А. С., Лебедев В. Ф., Лобачев В. В., Морозов А. В. Инженерно-физ. журн., 1984, т. 47, № 1, с. 53—59.
- [10] Кассади П. Э., Ньютон Дж. Ф., Роуз П. Г. Ракетная техника и космонавтика, 1978, т. 16, № 4, с. 29—39.
- [11] Кассади П. Э. Ракетная техника и космонавтика, 1981, т. 19, № 5, с. 67—91.
- [12] Хоффман П., Хюгель Г., Шаль В. Ракетная техника и космонавтика, 1977, т. 15, № 10, с. 182—184.
- [13] Ачасов О. В., Борейшо А. С., Быков А. М. и др. Препринт ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, № 18, Минск, 1981. 23 с.

- [14] Харченко С. С. Автореф. канд. дисс. Л., 1984. 22 с.
- [15] Бирюков А. С., Караханова И. В., Коноплев Н. А., Щеглов В. А. Препринт ФИАН СССР, № 87, М., 1984. 32 с.
- [16] Бирюков А. С. Тр. ФИАН, 1975, т. 83, с. 13—83.
- [17] Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977. 335 с.
- [18] Андерсон Дж. Газодинамические лазеры: введение. М.: Мир, 1979. 202 с.
- [19] Кассади П. Э., Пиндро А. Л., Ньютон Дж. Ф. Ракетная техника и космонавтика, 1979, т. 17, № 8, с. 59—70.
- [20] Реакции углерода с газами. М.: ИЛ, 1963. 360 с.
- [21] Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. М.; Л.: ГЭИ, 1959. 396 с.
- [22] Srivastava R., Rao V. S., Rao Y. V. S. Chem. Phys., 1980, v. 50, N 3, p. 405—412.
- [23] Волков А. Ю., Демин А. И., Кудрявцев Е. М. Препринт ФИАН, № 3, М., 1980. 22 с.
- [24] Кудрявцев Н. Н., Новиков С. С., Щеглов В. И. ДАН СССР, 1985, т. 282, № 2, с. 379—383.
- [25] Ковтун В. В., Новиков С. С., Светличный И. Б. ДАН СССР, 1982, т. 263, № 2, с. 332—334.
- [26] Бохон Ю. А., Давлетчин И. И., Марченко В. М. и др. Краткие сообщения по физике, 1972, № 11, с. 52—58.
- [27] Басов Н. Г., Громов В. В., Маркин Е. П. и др. Квант. электр., 1976, т. 3, № 5, с. 1154—1155.
- [28] Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. М., 1958. 688 с.

Институт общей физики
АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
27 октября 1986 г.