

УДК 621.039:62-622

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ $H_2-O_2-H_2O$ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ВОДОРОДНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

© 2022 г. Р. З. Аминов*, А. Н. Егоров, А. А. Рыжков

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия

**E-mail: oeptran@inbox.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2020 г.

После доработки 22.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Выполнено численное исследование влияния подмешивания насыщенного водяного пара в стехиометрическую смесь водорода с кислородом при изотермическом процессе горения в реакторе идеального смешения. Исследование изотермического процесса горения смеси в реакторе позволяет определить для конкретных условий горения равновесный состав продуктов сгорания, возможный минимальный химический недожог. При исследовании процесса горения смеси $H_2-O_2-H_2O$ использовались 24 элементарные химические реакции. Полученные результаты расчетов позволяют при испытаниях экспериментальных установок контролировать эффективность камеры сгорания. Выявлено влияние давления в реакторе на скорость горения смеси. Как показывают расчеты, увеличение давления повышает скорость горения, уменьшает недожог. Определена предельная максимальная доля водяного пара, обеспечивающая устойчивый процесс горения в зависимости от размера реактора и давления реагирующей смеси.

DOI: 10.31857/S0040364422040172

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследования по сжиганию водорода приобретают особую актуальность в связи с поиском альтернативных, прежде всего экологически чистых, технологий производства тепловой и электрической энергии [1]. При этом также подразумевается развитие водородной энергетики, например, в странах Европейского континента [2], в частности в Германии [3, 4]. Водородное топливо может стать одним из заменителей ископаемого топлива из-за отсутствия вредных выбросов при сгорании в кислородной среде [1, 2]. Экспериментально высокотемпературный стационарный режим горения впервые был осуществлен Лонгвелом и Вейсом [5] в реакторе идеального смешения. В результате полного интенсивного перемешивания в камере сгорания (реакторе) идеального смешения, где смесь подается по периферии цилиндра, а отводится от центра по оси цилиндра, можно достичь по всему объему реактора однородности свойств без образования заметной разницы концентраций реагирующей смеси. Реактор представляет собой широкую трубу с минимальным гидродинамическим сопротивлением и постоянной температурой горения. Горение протекает в изотермических условиях настолько энергично, что состав и температура газа на выходе из аппарата такие же, как и внутри него. Кинетические закономерности изотермического протекания реакции при энергичном протекании реакции рассмотрены в [6].

Температура продуктов горения водород-кислородной смеси в зависимости от давления достигает 2820–3760 К. Для увеличения срока службы водородного парогенератора, а также использования продуктов сгорания в качестве рабочего тела энергетических тепловых двигателей требуется снижение температуры горения водород-кислородной смеси. Для этого может осуществляться подмешивание низкотемпературного водяного пара (воды) в реакционный объем или на выходе из камеры сгорания. Исследования по применению в качестве топлива водород-кислородной смеси с примесью водяного пара в 1993 г. проводились в Японии и Германии [7–9]. В 2005 г. в Институте теплофизики СО РАН разработана экспериментальная установка и проведены тестовые испытания по сжиганию водород-кислородной смеси стехиометрического состава в потоке водяного пара [10]. В 2016 г. опубликованы результаты исследования процесса горения смесей водород-кислород и метан-кислород в среде слабонагретого водяного пара, выполненные совместно СО РАН, научно-производственным внедренческим предприятием “Турбокон” и Кузбасским государственным университетом [11]. В результате установлены основные закономерности при горении водород-кислородной смеси в потоке водяного пара, влияющие на полноту сгорания смеси. Показано, что при росте концентрации горючей смеси до 30% в суммарном потоке водяного пара доля несгоревшей горючей смеси снижается до 2%.

В 2020 г. сотрудниками Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра РАН совместно с ОИВТ РАН проведено экспериментальное исследование сжигания водород-кислородной смеси при стехиометрическом соотношении и с избытком окислителя при внешнем водяном охлаждении камеры сгорания [12]. Кроме того, выполнены расчеты процессов горения и теплообмена в водород-кислородной камере сгорания с использованием вычислительной гидрогазодинамики, представляющей собой инструмент моделирования для анализа механики жидкости и газа, сложных тепловых и многофазных явлений. Определены параметры продуктов сгорания в зависимости от конструкции и геометрических размеров камеры сгорания. Показано, что увеличение внутреннего диаметра и длины камеры сгорания приводит к снижению фактического недожога при неизменном расходе топлива. При этом фактический недожог оказывается значительным за счет диссоциации продуктов сгорания при высоких температурах [13].

Сжигание водорода в кислородной среде также подразумевает преобразование получаемой энергии в тепло или электроэнергию. Однако высокая температура горения затрудняет использование существующих энергоустановок для данных целей. В настоящее время актуализировались исследовательские работы для поиска решения этой проблемы. Ведутся разработки водород-кислородных камер сгорания, в том числе с подмешиванием водяного пара в продукты сгорания. В [14] экспериментально обоснована целесообразность использования вихревого противоточного циркуляционного потока водяного пара для снижения температуры до 1350 К при сжигании стехиометрической водородно-кислородной смеси. В [15, 16] показан подход к снижению высокой температуры и повышению эффективности при стехиометрическом сгорании водорода и кислорода в двигателях внутреннего сгорания за счет образования и впрыска водяного пара и рециркуляции продуктов сгорания. В [17] исследована эффективность сгорания водорода в кислородной среде при разбавлении паром. Проведена оценка характера движения продуктов сгорания, перемешивания и полноты сгорания.

Проводятся исследования по повышению эффективности сжигания водородного топлива в кислородной среде. В [18] представлены результаты моделирования процесса горения в микрокамере сгорания с выпуклой платформой и проанализировано влияние высоты выпуклой платформы и скорости на входе на эффективность сгорания водородного топлива в кислороде. В [19] приведены результаты численного моделирования горения предварительно перемешанной водородно-кислородной смеси внутри прямоугольной микрокамеры сгорания с сегментированным каталитическим слоем для повышения эффективности горения.

В [20] с целью уменьшения выбросов NO_x на традиционных газотурбинных электростанциях предложен полузамкнутый газотурбинный цикл, основанный на сжигании водородно-кислородной смеси с подмешиванием водяного пара. Для этого авторами проведено исследование специальной водород-кислородной камеры сгорания для сжигания водородного топлива без предварительного смешения при различных давлениях. Показано, что стабилизация пламени улучшается при увеличении давления.

Как следует из приведенного выше, экспериментальные и численные исследования проведены в основном при ограниченном диапазоне значений давления в камере сгорания и заданной конструкции, поэтому остается не до конца изученным влияние давления на эффективность и параметры процессов горения водород-кислородной смеси, в том числе для случаев подмешивания водяного пара. В связи с этим становится актуальным исследование влияния особенностей процессов горения и теплообмена при сжигании водород-кислородной смеси с подмешиванием водяного пара при различных геометрических параметрах камеры сгорания и давлениях горючей смеси.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящей работе рассмотрен способ снижения температуры горения водород-кислородной смеси за счет добавления насыщенного водяного пара. Исходными продуктами-реагентами являются газообразный водород и кислород, а также насыщенный водяной пар. Продукт химической реакции на выходе из камеры сгорания (реактора) – диссоциированный водяной пар. При этом рассмотрен идеальный процесс смешения, когда компоненты смеси подаются по периферии цилиндра, а продукты горения отводятся от центра по оси цилиндра при достижении по всему объему реактора однородности свойств без образования заметной разницы концентраций компонентов реагирующей смеси. Из этого следует, что предлагаемая методика не позволяет учесть механическое разбавление реагирующей смеси водяным паром и связанную с этим устойчивость горения. Учет этих факторов в большей степени необходим на завершающих этапах создания подобных водород-кислородных камер сгорания с конкретной системой подмешивания водяного пара, которая будет оказывать существенное влияние на итоговую эффективность процесса горения.

Горение протекает по изотермической реакции настолько энергично, что состав и температура газа на выходе из аппарата такие же, как и внутри него [13]. Горение исходной водород-кислородной смеси происходит в соответствии с элементарными химическими реакциями. Для исследования процессов при горении смеси $\text{H}_2\text{--O}_2\text{--H}_2\text{O}$

используются представленные в [21] 24 элементарные химические реакции.

Поток энергии при сжигании стехиометрической смеси водорода с кислородом определяется как полная энтальпия образовавшегося диссоциированного водяного пара [22, 23]. В процессе горения в химических реакциях принимают участие молекулы водорода, кислорода, водяного пара, перекиси водорода H_2O_2 ; атомы – водорода, кислорода; радикалы – OH , HO_2 . Реакции идут через простые двойные и тройные столкновения. Образование конечного продукта – диссоциированного водяного пара – происходит в результате последовательного чередования реакций с участием активных центров – атомов водорода, кислорода, радикалов OH и HO_2 , H_2O_2 [23, 24].

Полная энтальпия 1 кмоль диссоциированного водяного пара определяется по выражению [22, 24]

$$Q_d = \left(Q_{H_2O} (1 - \mu_{H_2O}) + \sum_1^b Q_i \mu_i + \sum_1^f H_i \mu_i \right),$$

где Q_{H_2O} – теплота образования, кДж/кмоль; μ_{H_2O} – мольная доля H_2O ; Q_i – теплота образования компонентов продуктов реакции горения, кДж/кмоль; $b = 6$ – количество реакций образования атомов H , O , радикалов OH , HO_2 и перекиси водорода H_2O_2 ; $f = 8$ – общее количество компонентов смеси (H_2O , H_2 , O_2 , H , OH , O , HO_2 , H_2O_2); H_i – энтальпия компонентов, кДж/кмоль; μ_i – мольная доля компонентов.

В расчетах используется энтальпия, отнесенная к 1 кг продуктов сгорания: полная удельная энтальпия $q_d = Q_d/M$; удельная энтальпия $h_j = H_j/M$, где M – молекулярная масса продуктов сгорания, кг/кмоль.

Полная удельная тепловая энергия смеси H_2 – O_2 – H_2O на входе в реактор определяется по выражению

$$h_{rg} = q_d (1 - g_{ns}) + g_{ns} h_{ns} = (q_d + G_{ns} h_{ns}) / (G_{cc} + G_{ns}), \quad (1)$$

где h_{ns} – энтальпия насыщенного пара, кДж/кг; g_{ns} – массовая доля насыщенного водяного пара $g_{ns} = G_{ns}/G$; G_{ns} – массовый расход насыщенного пара, кг/с; G – общая масса смеси H_2 – O_2 – H_2O : $G = G_{cc} + G_{ns}$; $G_{cc} = 1$ кг/с – расход стехиометрической смеси H_2 – O_2 .

Стоит отметить, что температура исходных компонентов водорода и кислорода соответствует нормальным условиям, а температура водяного пара – температуре насыщения при рассматриваемом давлении в реакторе.

Скорость химической реакции определяется выражением

$$w = -\frac{da}{dt} = -\frac{d}{dt} \left\langle \frac{N}{V} \right\rangle,$$

где N – количество вещества, моль; V – объем, cm^3 ; t – время, с; a – концентрация вещества, моль/ cm^3 .

Зависимость скорости элементарной химической реакции от температуры и концентрации реагентов определяется уравнением Аррениуса, которое связывает константу скорости химической реакции с температурой и энергией активации [6]:

$$w = k a_1 a_2.$$

Здесь a_1 и a_2 – молярные концентрации первого и второго реагентов бимолекулярной химической реакции, моль/ cm^3 ; k – константа скорости химической реакции:

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}} = A_0 T^m \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации, кДж/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль К); T – абсолютная температура, К; m – показатель степени.

Множитель A в выражении (2) мало зависит от температуры (для данной реакции) и в отдельных расчетах принимается постоянной величиной. A отражает общее число столкновений частиц в единицу времени, а также вероятность распада так называемого “активированного комплекса” на исходные вещества. Множитель $\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ характеризует долю частиц, обладающих энергией, достаточной для вступления в реакцию (долю активных молекул). Константы скорости определяются экспериментально [24].

В дальнейшем в методике расчетов для обозначения рассчитываемых скоростей реакций образования или расходования компонентов приняты индексы $j = 1-8$, для концентрации компонентов используются эти же индексы. Принятые обозначения представлены в таблице.

В 24 элементарных реакциях горения водород-кислородной смеси, представленных в [21], рассмотрены двойные столкновения реагентов. В элементарных бимолекулярных реакциях при простых двойных столкновениях скорость в i -й реакции j -го компонента записывается выражением

$$w_{ij} = k_i a_i a_{1i},$$

где k_i – константа скорости i -й реакции; a_i и a_{1i} – молярные концентрации первого и второго j -компонента i -й реакции.

Например, для первой элементарной химической реакции ($H + O_2 = OH + O$) из 24, используемых в расчетах, скорость расходования реагента H соответствует записи $w_{11} = -k_1 a_1 a_5$; скорость расходования реагента O_2 – $w_{15} = -k_1 a_1 a_5 = w_{11}$; скорость образования OH – $w_{12} = k_1 a_1 a_5 = -w_{11}$; скорость об-

Обозначения рассчитываемых величин

Индексы	1	2	3	4	5	6	7	8
Компоненты	H	OH	O	HO ₂	O ₂	H ₂	H ₂ O	H ₂ O ₂
Концентрации	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Скорости	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8

разования O – $w_{13} = k_1 a_1 a_5 = w_{12}$. Для третьей реакции ($H_2 + OH = H_2O + H$): $w_{36} = -k_3 a_6 a_2$, $w_{32} = -k_3 a_6 a_2 = w_{36}$, $w_{37} = k_3 a_6 a_2 = -w_{36}$; $w_{31} = k_3 a_6 a_2 = -w_{36}$ (обозначения коэффициентов см. в таблице).

Итоговая скорость образования компонентов смеси в 24 элементарных химических реакциях горения смеси $H_2-O_2-H_2O$ определяется выражением [24]

$$W_j = \sum_{i=1}^{24} w_{ij}, \quad (3)$$

где w_{ij} – скорость образования j -компонента в i -реакции, моль/(см³ с).

Очевидно, что для обеспечения образования диссоциированного водяного пара равновесного состава при сжигании исходной горючей смеси $H_2-O_2-H_2O$ продолжительность пребывания продуктов горения в камере сгорания должно быть не меньше времени, необходимого для завершения химической реакции горения.

Сохранение энергии в процессе осуществления химических реакций при отсутствии потерь тепла в окружающую среду определяется выражением [6, 24]

$$\frac{G}{V_p} \left(\sum_1^8 h_j g_j - \sum_1^3 h_i g_i \right) = QW(T), \quad (4)$$

где G – массовый расход реагентов, кг/с; V_p – объем реактора, м³; отношение G/V_p определяется температурой горения, температурой и свойствами исходных реагентов; $\left(\sum_1^8 h_j g_j - \sum_1^3 h_i g_i \right)$ – удельный тепловой эффект реакции горения смеси $H_2-O_2-H_2O$, кДж/кг; h_j, g_j – энтальпия и относительный массовый расход продуктов горения смеси $H_2-O_2-H_2O$, кДж/кг; h_i, g_i – энтальпия и относительный массовый расход исходных реагентов стехиометрической смеси H_2-O_2 и насыщенного водяного пара, кДж/кг.

Функция тепловыделения $QW(T)$ зависит от температуры горения смеси $H_2-O_2-H_2O$ и определяется произведением полной удельной энтальпии компонентов на итоговую скорость их образования W_i в элементарных химических реакциях (3) [6, 24]:

$$QW(T) = \sum_1^8 (Q_i + H_i) W_i. \quad (5)$$

Горение смеси в реакторе рассматривается при постоянном давлении. При расчете скорости потока учитывается изменение объемного расхода диссоциированного водяного пара при добавлении охлаждающей среды (водяного пара) из-за изменения температуры и массы исходной смеси:

$$V_{cm} = Gv_{cm}, \quad (6)$$

где v_{cm} – удельный объем диссоциированного пара, рассчитанный по температуре продуктов сгорания смеси $H_2-O_2-H_2O$ на выходе из реактора [23, 25, 26].

Время прохождения смеси через реактор t_{cm} определяется скоростью потока смеси и равно отношению объема реактора V_p к объемному расходу смеси V_{cm} :

$$t_{cm} = \frac{V_p}{V_{cm}}. \quad (7)$$

При определении предельной доли насыщенного водяного пара в исходной смеси $H_2-O_2-H_2O$, обеспечивающей равновесное горение, выполняются промежуточные расчеты объема камеры сгорания, отнесенного к расходу продуктов сгорания с изменением доли насыщенного водяного пара в смеси:

$$\frac{V_p}{Gv_{cm}} = \left(\sum_1^8 h_j g_j - \sum_1^3 h_i g_i \right) \frac{1}{QW(T)}. \quad (8)$$

При этом время протекания химической реакции, необходимое для завершения образования диссоциированного водяного пара равновесного состава при определяемой температуре горения, получается из решения уравнения

$$\frac{V_p}{Gv_{cm}} = \frac{\left(\sum_1^8 h_j g_j - \sum_1^3 h_i g_i \right)}{\sum_1^8 (Q_i + H_i) W_i v_{cm}}. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температура горения определяется с использованием таблицы из [26] как функция энтальпии продуктов горения в реакторе, рассчитанной по

выражению (1) в зависимости от массовой доли насыщенного водяного пара в исходной смеси и давления в реакторе. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Увеличение доли подмешиваемого водяного пара приводит к более существенному снижению температуры горения. При этом температура в реакторе в меньшей степени зависит от давления, что связано с увеличением влияния параметров подмешиваемого водяного пара, которые относительно слабо зависят от давления, и со снижением степени диссоциации за счет меньшей температуры в реакторе.

Итоговые скорости образования компонентов в интервале температуры горения от 1400 до 2800 К для давлений горючей смеси от 0.1 до 10 МПа рассчитаны с использованием формулы (3) и представлены графическими зависимостями на рис. 2. Расчеты выполнены при условии протекания равновесных химических процессов в элементарных реакциях горения в реакторе при подаче насыщенного водяного пара с массовой долей от 45 до 82%.

Увеличение расхода насыщенного водяного пара в реакторе приводит к увеличению скорости потока и сокращению времени пребывания смеси в реакторе. Для принятого размера реактора это может привести к недостаточности времени для завершения химической реакции превращения водород-кислородной смеси в диссоциированный водяной пар с равновесным составом и к увеличению недожога водорода, поэтому при проектировании камер сгорания со впрыском охлаждающей среды (водяного пара) требуется соответствующее изменение размеров. Минимальный размер реактора для принятой доли насыщенного водяного пара и получаемой температуры смеси определяется равенством продолжительности реакции и времени пребывания горючей смеси в реакторе.

Дальнейшие расчеты выполнены для расхода 1 кг/с исходных реагентов и образовавшихся продуктов сгорания, температура горения которых уменьшается при увеличении доли насыщенного пара, что приводит к уменьшению удельного объема продуктов сгорания и увеличению времени их пребывания в реакторе принятого объема. На рис. 3 представлены результаты расчетов продолжительности пребывания смеси в реакторе в зависимости от температуры горения при давлениях 6 и 0.1 МПа. В одинаковых диапазонах температуры горения продолжительность пребывания смеси отличается примерно в 58 раз, а, следовательно, объем реактора для сжигания смеси при давлении 0.1 МПа должен быть больше в 58 раз для обеспечения равновесного горения.

Допустимая максимальная доля насыщенного водяного пара в исходной смеси определяется решением системы уравнений (4)–(9) графоаналитическим методом, достигая равенства времени нахождения исходных компонентов в реакторе и вре-

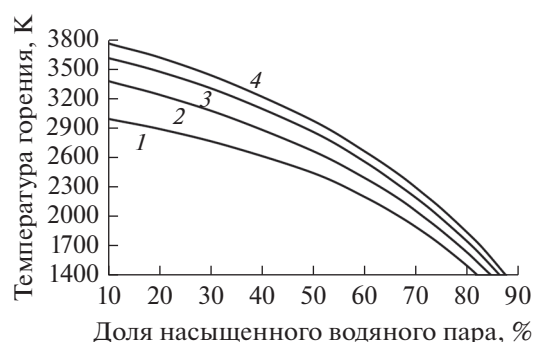


Рис. 1. Температура горения смеси $H_2-O_2-H_2O$ в зависимости от доли насыщенного водяного пара в общей массе смеси, подаваемой в реактор при давлениях: 1 – 0.1 МПа, 2 – 1, 3 – 6, 4 – 10.

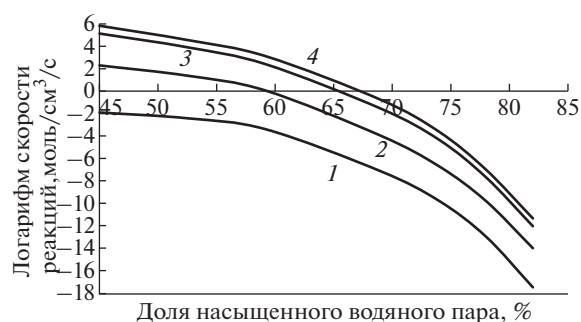


Рис. 2. Итоговые скорости реакций образования продуктов сгорания смеси $H_2-O_2-H_2O$ в зависимости от доли насыщенного водяного пара для давлений: 1 – 0.1 МПа, 2 – 1, 3 – 6, 4 – 10.

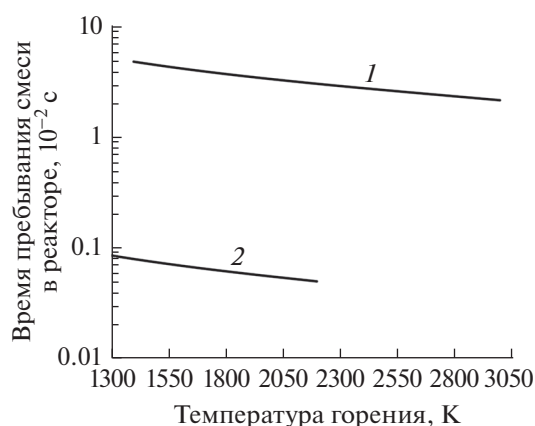


Рис. 3. Время пребывания смеси в реакторе в зависимости от температуры смеси в реакторе объемом 0.005 м^3 при давлении 6 МПа (1) и 0.1 (2).

мени, необходимого для завершения химической реакции и образования диссоциированного водяного пара равновесного состава при минимальном недожоге водорода. Расчеты проведены при давлении 6 МПа и расходе 1 кг/с стехиометрической смеси H_2-O_2 и предельной доли насыщенного водяного пара для реактора объемом 0.005 и 0.01 м^3 .

Рис. 4 приведен для определения максимальной доли подмешиваемого в горючую смесь H_2-O_2 насыщенного водяного пара, обеспечивающей устойчивую химическую реакцию горения и минимальную температуру продуктов сгорания. На оси ординат показано время, необходимое для образования равновесной смеси, и продолжительность пребывания смеси в реакторе. Максимальная доля насыщенного водяного пара определяется как пересечение кривых продолжительности пребывания реагирующей смеси в реакторе и необходимого времени для завершения химической реакции образования диссоциированного водяного пара равновесного состава. Слева от точки пересечения кривых на рис. 4 доля насыщенного водяного пара соответствует зоне образования продуктов сгорания равновесного состава. Справа от точки пересечения кривых, т.е. при доле впрыска водяного пара более 76.8% от массового расхода горючей смеси $H_2-O_2-H_2O$ для реактора объемом 0.005 м^3 и 77.15% для реактора объемом 0.01 м^3 , на выходе из реактора образуется диссоциированный водяной пар неравновесного состава, что приводит к повышенному недожогу водорода. Из рис. 4 также следует, что увеличение объема реактора в два раза не приводит к существенному увеличению предельной доли подмешиваемого насыщенного пара. При этом определяющей величиной, влияющей на предельную долю водяного пара, является скорость химической реакции.

На рис. 5 представлена зависимость продолжительности химической реакции от температуры смеси при давлениях 6 и 0.1 МПа. Продолжительности протекания химической реакции горения при атмосферном давлении и давлении 6 МПа существенно различаются для рассматриваемых условий. Эффективность работы реактора значительно увеличивается при повышении давления смеси за счет увеличения скорости химической реакции.

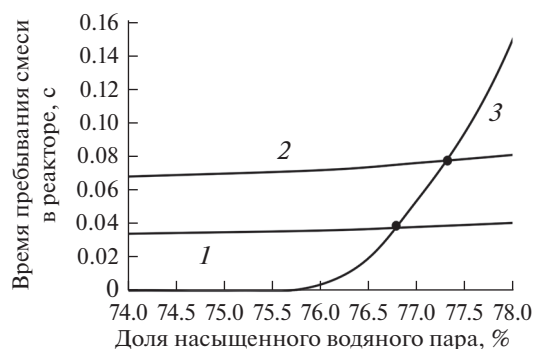


Рис. 4. Зависимость времени пребывания горючей смеси в реакторе при давлении 6 МПа: 1 — при $V_p = 0.005\text{ м}^3$, 2 — 0.01, 3 — продолжительность химической реакции.

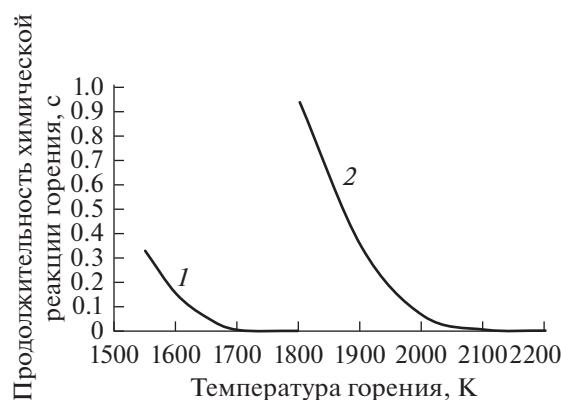


Рис. 5. Зависимость продолжительности химической реакции от температуры при давлении смеси 6 МПа (1) и 0.1 (2).

На рис. 6 представлена зависимость недожога водорода от доли подмешиваемого насыщенного водяного пара в горючей смеси для различных давлений в реакторе. Доля водорода в продуктах сгорания превышает 2% при доле подмешиваемого водяного пара более 47% и давлении 10 МПа и более 62% при 0.1 МПа. При снижении температуры горения, которая достигается увеличением доли подмешиваемого насыщенного водяного пара (см. рис. 1), недожог снижается до 2% при температуре 2140 К и давлении 0.1 МПа и 3030 К при 10 МПа. Таким образом, недожог водорода снижается при увеличении доли подмешиваемого насыщенного водяного пара из-за снижения температуры только при условии достижения после смешения диссоциированным водяным паром равновесного состава. При неравновесном горении доля недожога всегда больше. При определении результатов, представленных на рис. 6, принято, что содержание водорода (недожог) в продуктах сгорания определяется по равновесному составу диссоциированного водяного пара и зависит от температуры продуктов сгорания.

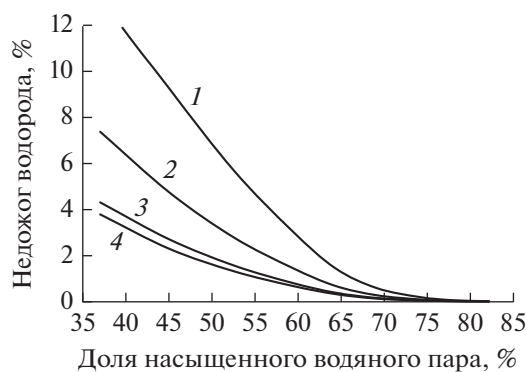


Рис. 6. Зависимость недожога водорода от доли подмешиваемого насыщенного водяного пара при давлениях: 1 — 0.1 МПа, 2 — 1, 3 — 6, 4 — 10.

Как было сказано выше, в условиях идеального реактора не учитывается влияние разбавления реагирующей смеси H_2-O_2 насыщенным водяным паром на вероятность успешного завершения реакции горения, что может приводить к некоторым неточностям при определении недожога водорода. Поэтому дополнительно проведено компьютерное моделирование процесса горения смеси $H_2-O_2-H_2O$ для аналогичных начальных условий на основе вычислительной гидрогазодинамики. При этом использовалась расчетная модель Species Transport, включающая в себя механизм детального описания реакций Eddy Dissipation Concept и кинетические уравнения на базе формулы Аррениуса [27]. Рассмотрена цилиндрическая камера сгорания, в которой водяной пар подается вместе с окислителем [7], с учетом выполнения условий образования продуктов сгорания равновесного состава.

На рис. 7 представлены результаты расчета температуры горения и недожога водорода в зависимости от доли подмешиваемого пара, полученные на основе компьютерного моделирования. При аналогичных начальных условиях температура горения оказывается ниже, а недожог водорода выше. Это вызвано тем, что модель расчета, применяемая при компьютерном моделировании, позволяет учесть механическое разбавление реагирующей смеси водяным паром и снижение вероятности прохождения химических реакций горения. Наибольшая разница в определении температуры горения и недожога водорода достигается при наибольшей доле подмешиваемого пара, что логично.

Также в процессе компьютерного моделирования определена максимальная доля подмешиваемого пара, при которой выполняется условие возможности горения смеси $H_2-O_2-H_2O$. Как показали расчеты, при увеличении доли подмешиваемого водяного пара более 27% стабильное горение смеси $H_2-O_2-H_2O$ невозможно. Поэтому результаты расчета процессов горения $H_2-O_2-H_2O$ в заданной камере сгорания при доле подмешиваемого водяного пара более 27% получены при ступенча-

том подмешивании пара: 27% подается непосредственно в смеси $H_2-O_2-H_2O$, а оставшаяся часть — в образующиеся продукты сгорания. Стоит отметить, что полученные результаты применимы только для конкретной камеры сгорания и способа подмешивания водяного пара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены расчетные исследования изотермического сжигания стехиометрической водород-кислородной смеси с подмешиванием насыщенного водяного пара в перспективном гомогенном химическом реакторе идеального смешения. Показана эффективность использования водяного пара при сжигании водорода для снижения температуры горения, что позволяет снизить затраты на производство водородного парогенератора и повысить его надежность и эффективность.

2. Определено влияние количества насыщенного водяного пара в горючей смеси на температуру горения. Увеличение доли насыщенного водяного пара до 82% снижает температуру горения смеси с 3600 до 1400 К. Показано влияние доли подмешиваемого насыщенного водяного пара в смеси на недожог водорода и скорость горения смеси при давлениях 10, 6, 1, 0.1 МПа. При увеличении давления горючей смеси от 0.1 до 10 МПа скорость горения увеличивается, а недожог водорода при доле насыщенного водяного пара 46% уменьшается с 10 до 2%, при доле насыщенного водяного пара 62.5% — с 2 до 0.4%.

3. Доказано, что определяющим показателем, влияющим на предельную долю подмешиваемого водяного пара, является скорость химических реакций. При этом подмешивание водяного пара существенно увеличивает время достижения равновесного состояния. Так, увеличение доли подмешиваемого водяного пара с 76 до 78% увеличивает время достижения равновесного состояния с 0.0037 до 0.151 с.

4. Показано, что изменение размеров реактора слабо влияет на величину допустимой доли подмешиваемого насыщенного водяного пара. При увеличении объема реактора в два раза предельные доли подмешиваемого водяного пара увеличиваются на 0.35%. При снижении давления сжигаемой смеси для достижения минимального недожога объем реактора также необходимо существенно увеличивать. При снижении давления в реакторе с 6 до 0.1 МПа объем реактора следует увеличить более чем в 50 раз. При этом подача исходных реагентов в количестве 1 кг/с в реактор объемом 0.005 и 0.01 м³ при давлении 6 МПа обеспечивает устойчивое горение смеси $H_2-O_2-H_2O$ при подмешивании 76.8 и 77.3% насыщенного водяного пара соответственно. Температура продуктов сгорания при предельной доле насыщенного водяного пара составляет 1860–1900 К.

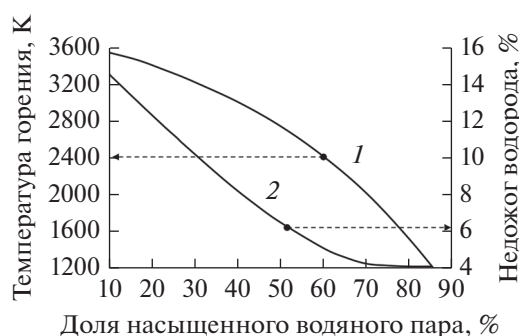


Рис. 7. Зависимость температуры горения $H_2-O_2-H_2O$ смеси (1) и недожога водорода (2) от доли подмешиваемого насыщенного водяного пара при 6 МПа.

5. Проведено компьютерное моделирование процесса горения смеси $H_2-O_2-H_2O$ с использованием расчетной модели Species Transport, которая позволяет учесть механическое разбавление реагирующей смеси водяным паром и снижение вероятности прохождения химических реакций горения. Показано, что при аналогичных начальных условиях температура горения оказывается ниже на 1.53 и 22.13%, а недожог водорода выше на 8.8 и 99.95% при 10 и 85% подмешиваемого водяного пара соответственно. При увеличении доли подмешиваемого водяного пара более 27% стабильное горение смеси $H_2-O_2-H_2O$ невозможно. Стоит отметить, что полученные результаты применимы только для конкретных камеры сгорания и способа подмешивания водяного пара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olabi A.G., Bahri A.S., Abdelghafar A.A., Baroutaji A., Sayed E.T., Alami A.H., Rezk H., Abdelkareem M.A. Large-scale Hydrogen Production and Storage Technologies: Current Status and Future Directions // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. № 45. P. 23498.
2. Frischmuth F., Härtel P. Hydrogen Sourcing Strategies and Cross-Sectoral Flexibility Trade-Offs in Net-Neutral Energy Scenarios for Europe // Energy. 2022. V. 238. Part B. 121598.
3. Neuwirth M., Fleiter T., Manz P., Hofmann R. The Future Potential Hydrogen Demand in Energy-Intensive Industries – A Site-Specific Approach Applied to Germany // Energy Convers. Manage. 2022. V. 252. 115052.
4. Peterssen F., Schlemminger M., Lohr C., Niepelt R., Bensmann A., Hanke-Rauschenbach R., Brendel R. Hydrogen Supply Scenarios for a Climate Neutral Energy System in Germany // Int. J. Hydrogen Energy. 2022. V. 47. № 28. P. 13515.
5. Longwell J.P., Weiss M.A. High Temperature Reaction Rates in Hydrocarbon Combustion // Ind. Eng. Chem. 1955. V. 47. P. 1634.
6. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
7. Development of Hydrogen-combustion Turbine. 1998. https://www.ena.or.jp/WE-NET/report/1998/english/8_2.htm
8. Fröhlke K., Haidn O.J. Spinning Reserve System Based on H_2/O_2 Combustion // Energy Convers. Manage. 1997. V. 38. № 10–13. P. 983.
9. Haidn O.J., Fröhlke K., Carl J., Weingartner S. Improved Combustion Efficiency of a H_2/O_2 Steam Generator for Spinning Reserve Application // Int. J. Hydrogen Energy. 1998. V. 23. № 6. P. 491.
10. Грязнов А.Н., Малышенко С.П. Парогенератор. Патент РФ 2309325. Заявл. 19.12.05; опублик. 27.10.07.
11. Прибатурин Н.А., Федоров В.А., Алексеев М.В., Богомолов А.Р., Сорокин А.Л., Азиханов С.С., Шевырев С.А. Экспериментальное исследование процесса горения смесей водород–кислород и метан–кислород в среде слабонагретого водяного пара // Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 31.
12. Аминов Р.З., Счастливцев А.И., Байрамов А.Н. Экспериментальная оценка состава генерируемого пара при сжигании водорода в кислороде // ТВТ. 2020. Т. 58. № 3. С. 437.
13. Аминов Р.З., Егоров А.Н. Исследование процессов в камере сгорания водорода в кислородной среде // ТВТ. 2018. Т. 56. № 5. С. 821.
14. Guryanov A.I., Piralishvili Sh.A., Guryanova M.M., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V. Counter-current Hydrogen–Oxygen Vortex Combustion Chamber. Thermal Physics of Processing // J. Energy Inst. 2020. V. 93. № 2. P. 634.
15. Haller J., Link T. Thermodynamic Concept for an Efficient Zero-Emission Combustion of Hydrogen and Oxygen in Stationary Internal Combustion Engines with High Power Density // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 44. P. 27374.
16. Wu Z., Wu J., Kang Z., Deng J., Hu Z., Li L. A Review of Water-steam-assist Technology in Modern Internal Combustion Engines // Energy Rep. 2021. V. 7. P. 5100.
17. Tanneberger T., Schimek S., Paschereit C.O., Stathopoulos P. Combustion Efficiency Measurements and Burner Characterization in a Hydrogen-Oxyfuel Combustor // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. № 56. P. 29752.
18. Pan J., Wang X., Lu Q., Chen L., Wang Y., Quay E.K. Effect of Convex Platform Structure on Hydrogen and Oxygen Combustion Characteristics in Micro Combustor // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. № 18. P. 10973.
19. Lu Q., Pan J., Hu S., Tang A., Shao X. Hetero-/Homogeneous Combustion of Premixed Hydrogen–Oxygen Mixture in a Micro-reactor with Catalyst Segmentation // Int. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. № 28. P. 12387.
20. Fan Y., Tsujimura T., Iki N., Kurata O., Furutani H. Investigation of Non-Premixed Hydrogen–Oxygen Impinging Jet Flame Under Steam Dilution // Proc. ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 2021. V. 3B. Combustion, Fuels, and Emissions. V03BT04A005.
21. Aminov R.Z., Gudym A.A. The Effect of the Composition of Elementary Chemical Reactions and the Uncertainty of the Rate Constants on the Accuracy of Calculating the Rate of Hydrogen Oxidation // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1111. 012021.
22. Кессельман П.М., Бланк Ю.И., Могилевский В.И. Термодинамические свойства термически диссоциированного водяного пара при температурах 1600–6000 К и давлениях 0.1–1000 бар // ТВТ. 1968. Т. 6. № 4. С. 658.
23. Аминов Р.З., Гудым А.А. Расчет калорических свойств диссоциированного водяного пара при высоких температурах // Теплоэнергетика. 2014. № 11. С. 55.
24. Азатян В.В., Андрианова З.С., Иванова А.Н. Роль радикалов HO_2 в окислении водорода в области третьего предела самовоспламенения // Кинетика и катализ. 2010. Т. 51. № 3. С. 358.
25. Аминов Р.З., Гудым А.А. Уравнения для вычисления свойств диссоциированного водяного пара // Теплоэнергетика. 2017. № 8. С. 57.
26. Аминов Р.З., Гудым А.А. Уравнения для промышленных расчетов термодинамических свойств высокотемпературного диссоциированного водяного пара // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 383.
27. Benim A.C., Pfeiffelmann B. Comparison of Combustion Models for Lifted Hydrogen Flames within RANS Framework // Energies. 2020. V. 13. № 1. P. 152.