

УДК 533.6.07

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ЛАМИНАРНОЕ ПЛАМЯ В БЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ

© 2023 г. А. М. Тереза^{1*}, Г. Л. Агафонов¹, Э. К. Андержанов¹, А. С. Бетев¹, С. П. Медведев¹, В. Н. Михалкин^{1,2}, С. В. Хомик¹, Т. Т. Черепанова¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова, Российской академии наук, Москва, Россия

²Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

*E-mail: tereza@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 26.05.2023;

после доработки 15.06.2023;

принята в печать 20.06.2023

Проведено численное моделирование влияния примесей Н, О, ОН, НО₂ и Н₂О₂ на структуру и скорость распространения ламинарных пламен в бедных (12% и 15% водорода) смесях водорода с воздухом при давлении 1 и 6 атм. Установлено, что при нормальных начальных условиях примеси в концентрации до 0.1% включительно не оказывают заметного влияния на нормальную скорость горения. При повышении начальной температуры до 400 К влияние примесей становится еще менее заметным. Из рассмотренных примесей только добавка ОН снижает скорость ламинарного пламени. Слабое влияние примесей объясняется перераспределением атомов О и Н через быстрые реакции в промежуточные продукты горения без заметного изменения скорости выделения тепла. Увеличение начального давления до 6 атм не меняет характер влияния примесей.

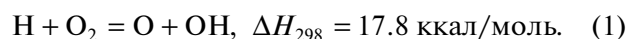
Ключевые слова: бедная водородно-воздушная смесь, ламинарное пламя, численное моделирование, химическая кинетика, примеси, детальный кинетический механизм.

DOI: 10.31857/S0207401X23120130, EDN: QKYMVI

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию влияния примесей на кинетику реакций в пламенах смесей водорода с кислородом или воздухом обусловлен как развитием технологий водородной энергетики, так и проблемами пожаро- и взрывобезопасности в отраслях промышленности, где применяется или образуется водород [1–3]. Хотя ингибирование и промотирование горения водородно-воздушных смесей — предмет многолетних исследований, многие вопросы, касающиеся механизма влияния различных добавок, остаются открытыми [2, 4]. Существует два основных пути попадания примесей в реагирующую среду. Первый — это преднамеренное добавление ингибиторов и промоторов в водородно-воздушные смеси с целью управления процессами горения и детонации [5]. Второй — присутствие неконтролируемых примесей, образующихся как при хранении и транспортировке водорода, так и в устройствах, в которых происходит горение водородно-воздушных смесей [2, 6–9]. Добавление неконтролируемой примеси может приводить к возникновению очагов, влиять на скорость распространения пламени и, таким образом, стать причиной аварийной ситуации [2, 8].

При распространении пламени в водородно-воздушных смесях наличие примесей может как ингибировать, так и промотировать процесс горения [5, 8, 10–13]. На кинетику горения могут влиять также начальные температура и давление [14, 15]. Действие ингибиторов на концентрационные пределы распространения пламени водородно-воздушных смесей активно исследовалось в работах [5, 16, 17]. В [5] были подробно рассмотрены кинетические аспекты влияния как активных, так и инертных добавок. Отмечено, что реакционная способность любых присадок определяется скоростью убыли атомарного водорода в зоне горения, что снижает скорость реакции разветвления



Механизм влияния активных ингибиторов в пламенах рассматривался в обзоре [4]. Исходя из ключевой роли разветвленных цепных реакций, было предложено считать предпочтительной концепцию влияния активных ингибиторов на концентрации атомов и радикалов, в первую очередь О, Н, ОН.

Особую сложность представляет прогнозирование влияния на процесс горения неконтроли-

руемых примесей, которые образуются за счет дополнительных факторов. Их наличие может быть вызвано различными причинами — от внешнего воздействия на компоненты смеси до гетерогенных реакций как на поверхностях емкостей, в которых хранится или транспортируется водород, так и в реакторе, где происходит горение водородно-воздушной смеси. Роль гетерогенных реакций водорода, кислорода и воды на поверхности в образовании примесей обсуждалась в [18–23]. В работах [24, 25] были представлены данные об образовании атомов О в газовой фазе вблизи твердой стенки реактора. На образование H_2O_2 у твердой поверхности указано в работах [19, 20, 26–31]. Перекись водорода, образующаяся в реакциях на поверхности, может служить источником радикалов OH и HO_2 [28, 29]. Механизм образования O , H , OH , HO_2 и H_2O_2 в гетерогенных реакциях подробно описан в обзоре [18].

Конвекция и диффузия могут приводить к возникновению в газовой фазе локальных объемов с повышенным содержанием образовавшихся у стенки примесей. В частности, в условиях турбулентного течения заметную роль могут играть так называемые *выбросы* — быстрые перемещения относительно небольших объемов газа от стенки во внешнюю область турбулентного пограничного слоя [32, 33]. Не исключено и присутствие “остаточных” примесей, от которых трудно избавиться [6, 34, 35].

К образованию плохо контролируемых примесей может приводить радиолиз воды, который является существенным фактором в случае аварийной ситуации на АЭС [36, 37]. Образующаяся под действием ионизирующего излучения возбужденная молекула воды (H_2O^*) распадается, вследствие чего получают атомы H и O , радикалы OH и HO_2 , а также молекулы H_2 и H_2O_2 [38, 39]. В результате этого процесса на АЭС в образующейся смеси водорода с воздухом могут присутствовать примеси в виде H , O , OH , HO_2 и H_2O_2 . В случае воспламенения такой смеси возможно отклонение скорости распространения пламени от таковой в “чистой” смеси. При этом, если концентрация водорода в смеси с воздухом может быть измерена или оценена с известной точностью, то концентрацию примесей в газовой фазе трудно определить из-за их высокой реакционной способности и неоднородности распределения по объему.

В представленной работе посредством численного моделирования изучено влияние примесей H , O , OH , HO_2 и H_2O_2 на скорость распространения ламинарного пламени в бедных смесях водорода с воздухом в условиях, которые могут возникнуть при аварийной ситуации на АЭС. Влияние паров воды в качестве примеси также рассматривалось.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

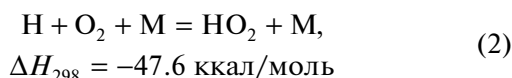
Процедура численного моделирования включала в себя расчеты скорости распространения ламинарного пламени, S_L , и анализ изменений профилей температуры и концентрации при варьировании параметров кинетического механизма. Все расчеты проведены с помощью модуля PREMIX программного обеспечения CHEMKIN-Pro, входящего в пакет программ ANSYS (Academic version) [40]. Использовалась модель свободного распространения пламени с количеством точек сетки не менее 1500, согласно рекомендациям из работы [41]. Расчеты S_L проводили с мультикомпонентными коэффициентами переноса и учетом термодиффузии. Транспортные коэффициенты взяты так же из [41]. Использовался детальный кинетический механизм (ДКМ) из работы [7], дающий для бедных смесей значения S_L , хорошо согласующиеся с результатами, полученными с использованием современных кинетических моделей, представленных в литературе [42]. Термодинамические данные для расчетов были взяты из работы [43]. Начальное давление P_0 принималось равным 1 и 6 атм. Выбор большего давления соответствует условию перехода от “медленного” (дозвукового) режима горения к “быстрому” (со скоростью звука) [44]. Концентрация водорода в его смеси с воздухом принималась равной 12% и 15% для $P_0 = 1$ атм и 15% для $P_0 = 6$ атм. Проведение расчетов S_L при меньших концентрациях водорода с помощью модуля CHEMKIN-Pro некорректно, так как используемая в нем модель плоского пламени не позволяет учесть искривление фронта пламени, характерное для ультрабедных смесей [45–47]. Надежные количественные данные о концентрациях H , O , OH , HO_2 и H_2O_2 в смесях водорода с воздухом в литературе отсутствуют. Имеются лишь грубые оценки их значений [6, 27–29, 34]. Поэтому расчеты проведены для максимально широкого диапазона возможных начальных концентраций исследуемых примесей — от 10 ppm до 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поскольку примеси обычно содержатся в исходной смеси водорода с воздухом, то первоначальная оценка проводилась для нормальных условий. В табл. 1 представлены результаты расчетов, которые проводили для каждой примеси отдельно при условии, что концентрации остальных примесей были нулевыми. Видно, что вплоть до концентрации в 0.1% их влияние ничтожно, и только начиная с концентрации в 1% оно становится заметным. Обращает на себя внимание тот факт, что присутствие любой примеси, кроме OH ,

увеличивает значение S_L . Самая высокая чувствительность обнаружена к примеси атома О.

Согласно результатам работы [48], образование и убыль промежуточных продуктов происходят симбатно в каждой из двух групп. К одной группе относятся H_2O_2 и HO_2 . К другой — О, Н и ОН. Также в [48] показано, что в сечении А (рис. 1) происходит инверсивная смена влияния этих групп реакций на тепловыделение. Сечение А соответствует температуре ~ 775 К, при которой наблюдается максимальный градиент температуры. Следует отметить, что для условий рис. 1 точка, где совпадают скорости конкурирующих реакций разветвления (1) и реакции обрыва цепи



(так называемый *кроссовер* [49, 50]), находится при температуре ~ 990 К (сечение С).

Таким образом, влияние примесей сказывается уже при температурах ниже T_A , т.е. в зоне, где реакция (2) преобладает по сравнению с реакцией (1). В этой зоне влияние примесей представляет наибольший интерес, поскольку технически ингибирование и промотирование пламен в основном осуществляется путем их добавления в исходную горючую смесь при нормальных условиях. Поэтому следует ожидать, что к моменту достижения T_C эффект от примесей уже полностью проявится.

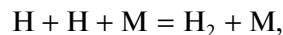
Первоначально был проведен сравнительный анализ чувствительности к реакциям, определяющим концентрации H_2O_2 и ОН как представителей двух групп промежуточных продуктов, при $T_0 = 330$ К. Эта температура соответствует концентрации паров воды, равной приблизительно 5% от ее значения в зоне конечных продуктов, и уменьшению на треть концентрации водорода [48]. Результаты анализа чувствительности представлены на рис. 2. Видно, что одни и те же реакции определяют профили концентраций H_2O_2 и ОН. Однако вклады большинства этих реакций в изменение концентраций H_2O_2 и ОН противоположны. Реакции (5), (7), (8), (10) влияют на концентрацию H_2O_2 намного слабее (см. рис. 2), чем реакции (1)–(4). Влияние последних на концентрацию H_2O_2 соответствует их доминирующему вкладу в тепловыделение [48]. С другой стороны, в зоне начала повышения температуры реакции (1)–(4) противоположным образом влияют на концентрацию ОН по сравнению с H_2O_2 .

Среди важнейших десяти реакций, определяющих концентрацию HO_2 , следует обратить внимание на реакции (1)–(6) — см. рис. 3а. Эти же реакции контролируют образование H_2O_2 , но для гидропероксильного радикала реакция (5) имеет доминирующее значение. При повышении тем-

Таблица 1. Влияние примесей на ламинарную скорость распространения пламени в смеси 12% H_2 + воздух при нормальных условиях

Концентрация примеси, ppm	S_L , см/с				
	Н	О	ОН	HO_2	H_2O_2
0	7.62				
10	7.63	7.63	7.61	7.63	7.63
100	7.66	7.64	7.58	7.64	7.61
1000	7.82	7.91	7.55	7.76	7.73
10000	9.13	9.68	7.2	8.45	8.93

пературы доминирование реакции (5) в формировании концентрации HO_2 еще более усиливается по сравнению с вкладом других реакций (рис. 3б). При этом влияние реакции (2) на образование HO_2 меняется на противоположное, а чувствительность к влиянию реакций (1), (3), (4) и (6) становится незначительной. Вследствие избытка O_2 в бедных водородно-воздушных смесях преобладает влияние реакций с участием кислорода и невелико влияние реакции



чувствительность к которой характерна для более богатых водородно-воздушных смесей [49–51].

Согласно результатам, полученным в [48], ни одна реакция с участием H_2O_2 не оказывает заметного влияния на тепловыделение в пламени. В то же время реакция (8), которая практически не влияет на образование H_2O_2 , HO_2 и ОН, в значительной степени определяет динамику тепловыделения [48]. Реакция (11), наоборот, незначительно влияет на рост температуры, но вместе с реакцией

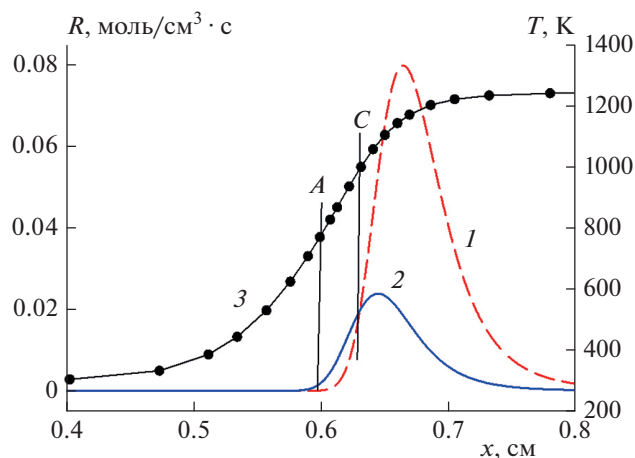


Рис. 1. Профили скоростей конкурирующих реакций (1) и (2) — кривые 1 и 2 соответственно, и температуры — кривая 3 в пламени смеси 12% H_2 + воздух при $T_0 = 298$ К, $P_0 = 1$ атм.

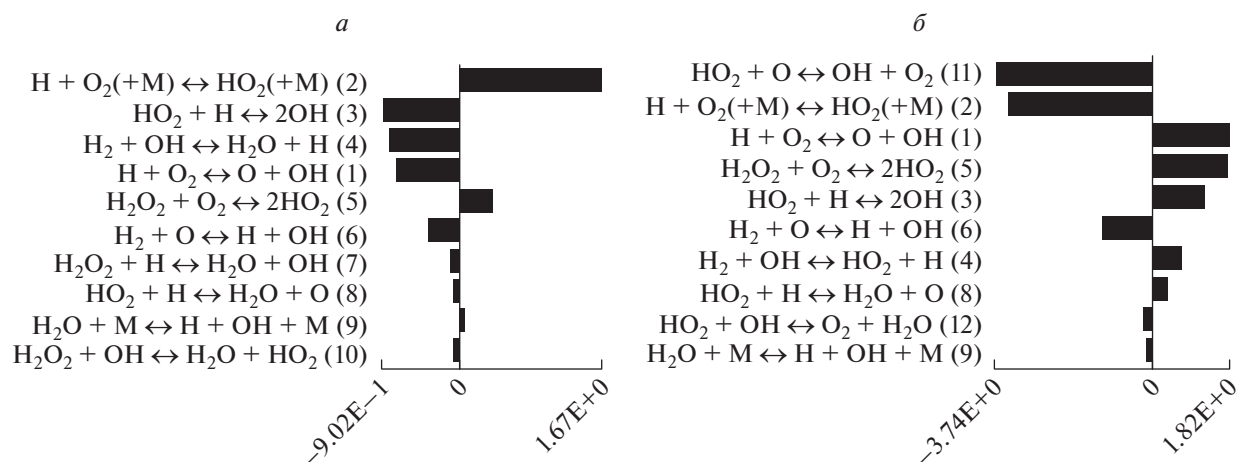


Рис. 2. Анализ чувствительности ведущих реакций к образованию H_2O_2 (а) и OH (б) при $T_0 = 330$ К. Смесь 12% H_2 + воздух при $P_0 = 1$ атм.

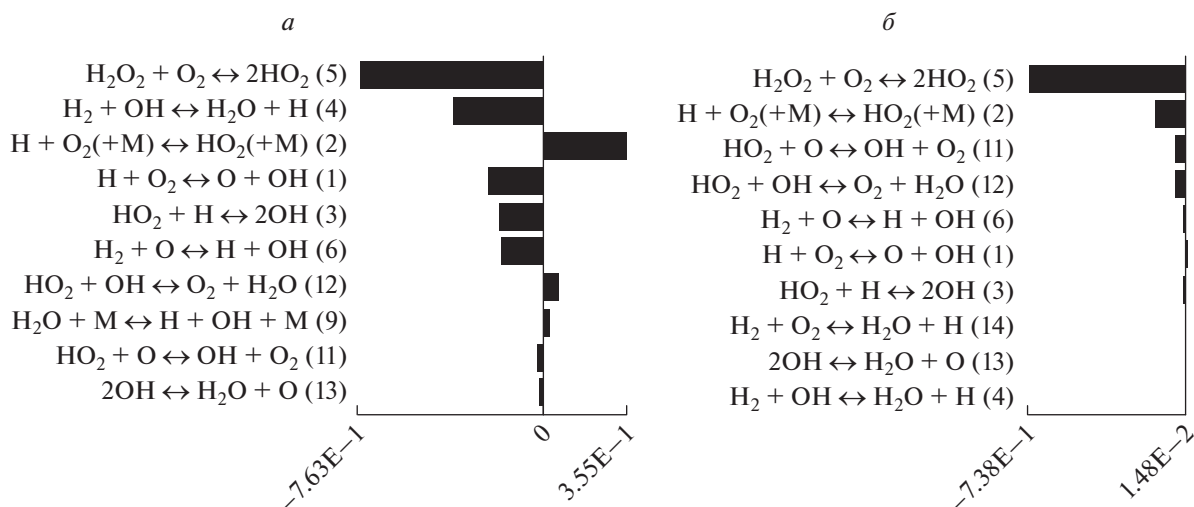


Рис. 3. Анализ чувствительности ведущих реакций к образованию HO_2 в смеси 12% H_2 + воздух при $P_0 = 1$ атм для сечений с $T = 330$ (а) и $T = 373$ К (б).

(2) играет доминирующую роль в снижении концентрации OH (рис. 2б). Любая из рассматриваемых примесей при ее концентрации до 0.1% через реакции (1)–(14) с участием наиболее активных атомов O и H быстро трансформируется в промежуточные продукты. При этом скорость тепловыделения и кинетика разветвленного цепного процесса почти не изменяются. Таким образом, структура и скорость распространения пламени в бедных водородно-воздушных смесях устойчивы к примесям при их концентрациях ниже 0.1%.

В условиях аварийных ситуаций в технологических установках могут возникать зоны повышенной температуры смеси водорода с воздухом. Так, при радиоллизе воды происходит разогрев в контуре охлаждения АЭС, в результате чего тем-

пература водородно-воздушной смеси может заметно возрасти. Аналогичное поведение характерно для температуры окружающей среды при разогреве рекомбинаторов, поглощающих водород [52]. Чтобы учесть этот эффект, были проведены расчеты для пламени при начальной температуре среды 400 К (табл. 2). Эта температура соответствует зоне пламени, в которой начинается ощутимый рост концентраций H_2O_2 и HO_2 [48]. Из табл. 2 видно, что при нормальных условиях любая из исследованных примесей при ее концентрации до 0.1% не оказывает заметного влияния на пламя — относительное изменение значения S_L при $T_0 = 400$ К меньше, чем в случае $T_0 = 298$ К. Влияние каждой примеси при $T_0 = 400$ К аналогично их действию в случае $T_0 = 298$ К.

Таблица 2. Влияние примесей на ламинарную скорость распространения пламени в смеси 12% H_2 + воздух при $P_0 = 1$ атм и $T_0 = 400$ К

Концентрация примеси, ppm	S_L , см/с				
	H	O	OH	HO ₂	H ₂ O ₂
0	23.43				
10	23.44	23.44	23.44	23.45	23.44
100	23.49	23.5	23.4	23.52	23.48
1000	23.85	24.24	23.06	23.79	23.81
10000	25.81	31.88	20.45	25.87	27.07

Таблица 3. Влияние примесей на ламинарную скорость распространения пламени в смеси 15% H_2 + воздух при нормальных атмосферных условиях

Концентрация примеси, ppm	S_L , см/с				
	H	O	OH	HO ₂	H ₂ O ₂
0	28.5				
10	28.6	28.6	28.6	28.6	28.6
100	28.6	28.7	28.6	28.6	28.6
1000	29.1	29.6	28.6	29.0	29.0
10000	32.4	36.7	29.4	31.4	32.7

Таблица 4. Влияние примесей на ламинарную скорость распространения пламени в смеси 15% H_2 + воздух при $P_0 = 6$ атм и $T_0 = 298$ К

Концентрация примеси, ppm	S_L , см/с				
	H	O	OH	HO ₂	H ₂ O ₂
0	8.49				
10	8.49	8.49	8.50	8.51	8.49
100	8.51	8.51	8.47	8.52	8.53
1000	8.76	8.70	8.39	8.67	8.78
10000	11.0	9.92	8.22	10.1	11.4

Распространение пламени в замкнутых объемах сопровождается повышением давления. С учетом этого были проведены дополнительные расчеты при $P_0 = 6$ атм. Поскольку с повышением давления значение S_L падает, расчеты проводились для 15%-ной концентрации H_2 в воздухе (табл. 3 и 4). Из сравнения табл. 1–4 видно, что с ростом давления тенденции влияния примесей не меняются. Это означает, что реакции мономолекулярного распада, зависящие от давления, не дают существенного вклада в кинетику распространения пламени при концентрациях примесей до 0.1%. Как и при $P_0 = 1$ атм, перемещение атомов O и H из примесей в промежуточные продукты

горения происходит в зоне малого тепловыделения (при температурах ниже T_A).

Было изучено также влияние паров воды в количестве до 1% от общего состава смеси. Поскольку влияния H_2O не обнаружено, в табл. 1–4 колонка для воды не представлена.

ВЫВОДЫ

В рамках численного моделирования ламинарного пламени бедных смесей водорода с воздухом получены следующие результаты.

1. Добавка примесей в виде H, O, OH, HO₂ и H₂O₂ в исходную смесь при их концентрациях до 0.1% не приводит к заметному изменению скорости ламинарного пламени.

2. С повышением начальной температуры смеси влияние примесей еще больше ослабевает. Из изученных примесей только OH незначительно понижает скорость ламинарного пламени, а все остальные ускоряют распространение пламени.

3. Незначительное влияние примесей на скорость ламинарного пламени объясняется быстрым перемещением атомов O и H в промежуточные продукты горения в начальной зоне пламени, где тепловыделение мало. При этом скорость тепловыделения почти не изменяется.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение госзадания (тема № 122040500073-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogers R.C., Schexnayder C.J., Jr. // VA. Paper 1856. NASA: Hampton, 1981.
2. Заманский В.М., Борисов А.А. // Итоги науки и техники. Сер. кинетика и катализ. Т. 19. М.: ВИНТИ, 1989.
3. Аветисян А.А., Азатян В.В., Калачев В.И. и др. // Кинетика и катализ. 2007. Т. 48. № 1. С. 12.
4. Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Шварцберг В.М. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 22.
5. Азатян В.В., Сайкова Г.Р., Балаян Г.В., Пугачев Д.В. // ЖФХ. 2015. Т. 89. № 3. С. 385.
6. Urzay J., Kseib N., Davidson D.F., Iaccarino G., Hanson R.K. // Combust. and Flame. 2014. V. 161. № 1. P. 1.
7. Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 6. С. 35.
8. Азатян В.В., Прокопенко В.М., Абрамов С.К. // ЖФХ. 2019. Т. 93. № 4. С. 622.
9. Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 70.
10. Shebeko Yu.N., Azatyan V.V., Bolodian I.A. et al. // Combust. and Flame. 2000. V. 121. P. 542.
11. Большова Т.А., Коробейничев О.П. // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 5. С. 3.

12. *Linteris G.T., Babushok V.* // Proc. Combust. Inst. 2009. V. 32. P. 2535.
13. *Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю.* // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 106.
14. *Glukhov I.S., Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Zuban A.V.* // J. Loss Prev. Process. Ind. 2020. V. 66. P. 104195.
15. *Азатян В.В.* // Кинетика и катализ. 2020. Т. 61. № 3. С. 291.
16. *Azatyany V.V., Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu. et al.* // J. Loss Prev. Process. Ind. 2007. V. 20. № 4–6. P. 494.
17. *Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Golov N.V., Zuban A.V., Yurkin A.A.* // J. Loss Prev. Process. Ind. 2017. V. 46. P. 195.
18. *Sinev M.Yu.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2007. V. 1. № 4. P. 412.
19. *Dryer F.L., Chaos M.* // Combust. and Flame. 2008. V. 152. P. 293.
20. *Chaos M., Dryer F.L.* // Comb. Sci. Tech. 2008. V. 180. № 6. P. 1053.
21. *Schonborn A., Sayad P., Konnov A.A., Klingmann J.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2014. V. 39. № 23. P. 12166.
22. *Азатян В.В., Абрамов С.К., Борисов А.А., Прокопенко В.М., Чапышева Н.В.* // ЖФХ. 2013. Т. 87. № 3. С. 409
23. *Азатян В.В., Ведешкин Г.К., Филатов Ю.М.* // Вестн. РАН. 2019. Т. 89. № 3. С. 279.
24. *Налбандян А.Б., Воеводский В.В.* Механизм окисления и горения водорода. М.: Изд-во АН СССР, 1949.
25. *Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е.* Кинетика и механизм газофазных реакций. М.: Наука, 1974.
26. *Забайкин В.А., Perkov E.V., Tret'yakov P.K.* // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 3. С. 70.
27. *Козлов С.Н., Александров Е.Н., Кузнецов Н.М., Маркевич Е.А.* // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 11. С. 75.
28. *Александров Е.Н., Маркевич Е.А., Козлов С.Н., Частухин Д.С., Кузнецов Н.М.* // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 1. С. 3.
29. *Маркевич Е.А., Козлов С.Н., Александров Е.Н., Кузнецов Н.М.* // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 6. С. 47.
30. *Rubtsov N.M.* Key Factors of Combustion. From Kinetics to Gas Dynamics. Cham, Switzerland: Springer, 2017.
31. *Tingas E.Al., Kyritsis D.C., Goussis D.A.* // J. Energy Eng. 2019. V. 145(1). P. 04018074.
32. *Cantwell B.J.* // Annu. Rev. Fluid Mech. 1981. V. 13. P. 457.
33. *Репик Е.У., Соседко Ю.П.* Турбулентный пограничный слой. М.: Физматлит, 2007.
34. *Hu E., Pan L., Gao Z. et al.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. P. 13261.
35. *Mulvihill C.R., Petersen E.L.* // Proc. Combust. Inst. 2019. V. 37. Issue 1. P. 259; <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.024>
36. *Abagyan A.A., Adamov E.O., Burlakov E.V.* // Proc. IAEA Conf. (Intern.). IAEA-J4-TC972. Vienna, Austria: Springer, 1996. P. 46.
37. *Saji G.* // Nucl. Eng. Des. 2016. V. 307 P. 64; <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.01.039>
38. *Von Sonntag C., Schuchmann H.-P.* // Methods Enzymol. 1994. V. 233. P. 3; [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(94\)33004-2](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(94)33004-2)
39. *Macdonald D.D., Engelhardt G.R., Petrov A.A.* // Corros. Mater. Degrad. 2022. V. 3. P. 470; <https://doi.org/10.3390/cmd3030028>
40. CHEMKIN-Pro 15112. CK-TUT-10112-1112-UG-1. Reaction Design: San Diego, 2011.
41. *Keromnes A., Metcalfe W.K., Heufer K.A. et al.* // Combust. and Flame. 2013. V. 160. P. 995.
42. *Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К. и др.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 66.
43. *Goos E., Burcat A., Ruscic B.* New NASA thermodynamic polynomials database with active thermochemical tables updates. Argonne Natl. Labor., Tech.-Israel Inst. Technol., Chicago, IL, Tel-Aviv. Rep. ANL 05/20, TAE 960. 2016; <http://garfield.chem.elte.hu/Burcat/burcat.html>
44. *Grune J., Sempert K., Haberstroh H., Kuznetsov M., Jordan T.* // J. Loss Prev. Process. Ind. 2013. V. 26. P. 317.
45. *Yakovenko I.S., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Melnikova K.S.* // Intern. J. Hydrogen Energy. 2018. V. 43. P. 1894; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.138>
46. *Volodin V.V., Golub V.V., Kiverin A.D. et al.* // Combust. Sci. Tech. 2021. V. 193. Issue. 2. P. 225; <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1748606>
47. *Яковенко И.С., Медведев И.С., Киверин А.Д.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 1.
48. *Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К. и др.* // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 8. С. 68.
49. *Qiao L., Kim C.H., Faeth G.M.* // Combust. and Flame. 2005. V. 143. P. 79.
50. *Sanchez A.L., Williams F.A.* // Progr. Energy Combust. Sci. 2014. V. 41. P. 1.
51. *Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Рыбцкая И.В. и др.* // Кинетика и катализ. 2009. Т. 50. № 2. С. 170.
52. *Козлов С.Н., Тереза А.М., Медведев С.П.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 34.