

Изучение кинетики окисления 2-пентанола за ударными волнами

Н. С. Быстров, А. В. Емельянов, Е. С. Курбатова и П. И. Яценко

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: bystrovns.jiht@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2024 г.

Аннотация. Работа посвящена экспериментальным и численным исследованиям окисления смеси 2-пентанола с молекулярным кислородом в условиях сильного разбавления в аргоне при температурах 1600–3000 К и давлениях 2–3 бар. Изучена кинетика реакций 2-пентанола, и осколков его распада, с атомами и молекулами кислорода. Проведены количественные время-разрешенные измерения образования и потребления кислорода $O(^3P)$ во время окисления 2-пентанола с использованием высоковакуумной ударной трубы и прецизионного метода атомно-резонансной абсорбционной спектроскопии. Экспериментальные данные были смоделированы численно с использованием новой кинетической модели горения высокомолекулярных спиртов Dayma *et al.* На основании проведенного кинетического анализа путей образования продуктов и чувствительности констант скоростей элементарных реакций были определены ключевые реакционные пути окисления 2-пентанола и рассмотрены способы повышения предсказательных способностей тестируемой модели. Сведения, полученные в ходе комплексного кинетического исследования, представляют новую информацию об особенностях взаимодействия высокомолекулярных спиртов с кислородом, и будут полезны при разработке и валидации моделей горения оксигенатов, необходимых для реализации их чистого и эффективного сжигания.

1. ВВЕДЕНИЕ

Спирты — перспективные альтернативные виды топлива, которые рассматриваются в качестве высокофункциональных присадок к традиционным углеводородам [1, 2]. Спирты высокой молекулярной массы от пяти и более атомов углерода наиболее интересны для практического внедрения в существующую энергетическую инфраструктуру благодаря их физико-химическим свойствам: высокой плотности энергии, низкому давлению насыщенных паров, малому влагопоглощению и др. [3]. Одним из таких соединений является 2-пентанол ($C_5H_{11}OH$ -2, -амиловый спирт), который может использоваться в качестве самостоятельного топлива и/или компонента топливной смеси в дизельных и реактивных двигателях [4, 5] с высокими характеристиками горения и ингибирующими свойствами вредной эмиссии. Исследования горения изомеров пентанола были мотивированы, в том числе, появлением новых методов их синтеза [6], позволивших начать широкомасштабное производство пентанола экономически эффективными методами [7].

Параллельно с прикладными исследованиями в двигателях были изучены и фундаментальные свойства горения 2-пентанола, однако это единичные работы в сильно ограниченных термодинамических диапазонах. Li *et al* [8] измерили ламинарные скорости распространения пламен 2-пентанола с воздухом (393–473 К, 1.0–7.5 бар, $\varphi = 0.6$ –1.8). Köhler *et al* [9] провели исследования в пламенах низкого давления с предварительным смешением (~ 1150 К, 20 мбар, $\varphi = 1.5$), где измерили мольные доли основных и промежуточных продуктов горения (CO_2 , H_2O , C_2H_2 , CH_2O , CH_3 и др.) методом молекулярно-лучевой масс-спектрометрии, на основе чего представили первую кинетическую схему горения 2-пентанола. Позднее, в теоретическом исследовании авторов Bai *et al* [10], методами квантовой химии были рассчитаны термодинамические данные и константы скорости реакций разложения 2-пентанола в широком диапазоне температур и давлений (300–2000 К, 0.01–100 бар). Следом,

при участии авторов теоретической работы [10], Dayma *et al* [11] провели обширные экспериментальные исследования кинетики горения 2-пентанола: в реакторе струйного перемешивания (500–1180 К, 10 бар, φ от 0.35 до 4) методами инфракрасной спектрометрии и газовой хроматографии измерены мольные доли ряда реагентов, продуктов и промежуточных соединений (CO , CH_4 , CH_2O , C_5H_{10} и др.); в ударной трубе измерены задержки воспламенения смесей $C_5H_{11}OH$ -2 + O_2 + Ar (1070–1460 К, 20/40 бар, $\varphi = 0.5$, 1 и 2). На основе имеющихся и новых экспериментальных данных, при поддержке квантово-химических вычислений [10], Dayma *et al* [11] представили новую кинетическую модель горения 2-пентанола, где с применением анализа путей образования продуктов и чувствительности элементарных реакций скорректировали кинетику окисления 2-пентанола в исследуемых экспериментальных условиях. Авторы модели [11] продемонстрировали ее высокие предсказательные способности по небольшому набору имеющихся экспериментальных данных, однако отметили, что необходимы значительно большие объемы кинетических сведений, в особенности по видообразованию окисления и пиролиза 2-пентанола при более низких давлениях.

В соответствии с вышесказанным, цель настоящей работы — предоставить новые экспериментальные данные по кинетике окисления 2-пентанола в широком диапазоне температур 1600–3000 К при невысоких давлениях 2–3 бар и протестировать кинетическую модель горения 2-пентанола [11] с проведением детального кинетического анализа численных результатов по экспериментальным данным. Полученные сведения будут полезны при дальнейшей разработке детальных кинетических моделей горения кислородсодержащих биотоплив, которые, как известно, являются высокоэффективным инструментом синергетического проектирования топлив и двигателей, необходимых для реализации альтернативных путей производства и использования энергии [12].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Данное исследование является продолжением цикла работ по кинетике окисления кислородсодержащих биотоплив, в которых уже было приведено исчерпывающее описание экспериментальной методики [13, 14]. Ниже будут приведены только общие сведения.

Все эксперименты были проведены на высоковакуумной ударной трубе (УТ) диафрагменного типа из нержавеющей стали. Кинетические измерения проводились методом атомно-резонансной абсорбционной спектроскопии на атоме кислорода (О-АРАС) за отраженными ударными волнами. Камеры высокого и низкого давлений (КВД, КНД) ударной трубы составляли 2.7 и 6.6 м соответственно, с внутренним диаметром 107 мм; КНД откачивалась до $2 \cdot 10^{-7}$ мбар. В качестве диафрагмы между камерами использовались предварительно отожженные алюминиевые пластины толщиной 170 мкм. Расчет параметров за падающей и отраженной ударными волнами (ПУВ, ОУВ) выполнялся на основе одномерных уравнений газовой динамики [15]. Скорость падающей ударной волны измерялась с помощью датчиков давления. Для спектроскопических измерений использовались MgF₂-окна диаметром 9 мм с пропусканием в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ).

Все газовые смеси были приготовлены методом парциальных давлений в 60 литровом смесевом баке из нержавеющей стали. Перед каждым этапом разбавления смесь выдерживалась в смесевом баке минимум 12 часов для ее полной гомогенизации. В составе исследуемых газовых смесей использовались высокочистые газовые компоненты: C₅H₁₁ОН-2 — 98.0% (Sigma-Aldrich), Ar — 99.9999% (Voessen), O₂ — 99.9999% (Linde Gas), N₂O — 99.9994% (Horst company). В качестве толкающего газа использовался He — 99.99% (МГПЗ). Основная экспериментальная серия была проведена в смеси 10 ppm C₅H₁₁ОН-2 + 10 ppm O₂ + Ar. Калибровочные серии экспериментов были проведены в смесях 5 ppm, 2.5 ppm, 1.25 ppm O₂ + Ar и 0.1–20.0 ppm N₂O + Ar.

Полученные в эксперименте время-разрешенные абсорбционные профили атомов О переводились в концентрационные с помощью оригинальной калибровочной процедуры, также описанной ранее [16] без каких-либо дополнительных модификаций. Общее время наблюдений за отраженной ударной волной составляло ~ 1000 мкс и ограничивалось приходом вторичных возмущений в секцию спектроскопических измерений. Неопределенность полученных время-разрешенных концентрационных профилей оценивается в 12%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Экспериментальные и расчетные профили атомарного кислорода

Основная серия экспериментов проводилась в сильно разбавленной смеси 10 ppm C₅H₁₁ОН-2 + 10 ppm O₂ + Ar. В каждом эксперименте регистрировались резонансное поглощение атомарного кислорода на длине волны 130.5 нм и профиль давления (рисунок 1). За фронтом отраженной ударной волны наблюдается увеличение сигнала поглощения, обусловленное образованием атомов О — медленным в случае относительно низких температур (1606 К) и более быстрым в случае

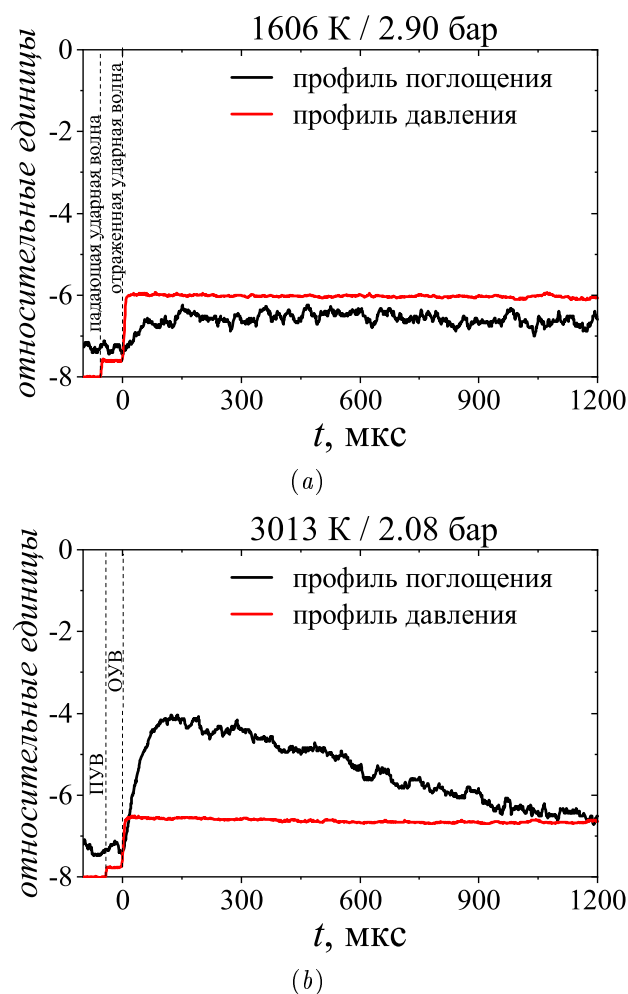


Рисунок 1. Типичные сигналы поглощения атомов кислорода и давления в исследуемой смеси при относительно низких и высоких температурах.

высоких (3013 К). Низкотемпературный абсорбционный профиль характеризуется условно стационарным уровнем сигнала после ~ 200 мкс, что отражает равновесие между реакциями образования и потребления атомов кислорода. Высокотемпературный профиль характеризуется формированием локального пика концентрации [O]_{max} за 100 мкс с последующим плавным падением сигнала, отражающим доминирующее потребление атомов кислорода продуктами разложения 2-пентанола. Стационарность профилей давления за отраженными ударными волнами отражает постоянство плотности и температуры смеси (в рамках заявленных неопределенностей) в исследовательской секции измерений.

Ниже приведены время-разрешенные концентрационные профили образования и потребления атомов О при окислении 2-пентанола во всем исследуемом диапазоне температур и давлений (рисунок 2).

В диапазоне температур от ~ 1600 до ~ 2000 К наблюдается плавное, ускоряющееся с ростом температуры повышение мольной доли атомов О в течение первых ~ 200 мкс с сохранением условно стационарного уровня концентрации до конца экспериментального времени наблюдения. Начиная с температуры ~ 2200 К профили характеризуются формированием локальных пиков концентрации [O]_{max}, с последующим, после их

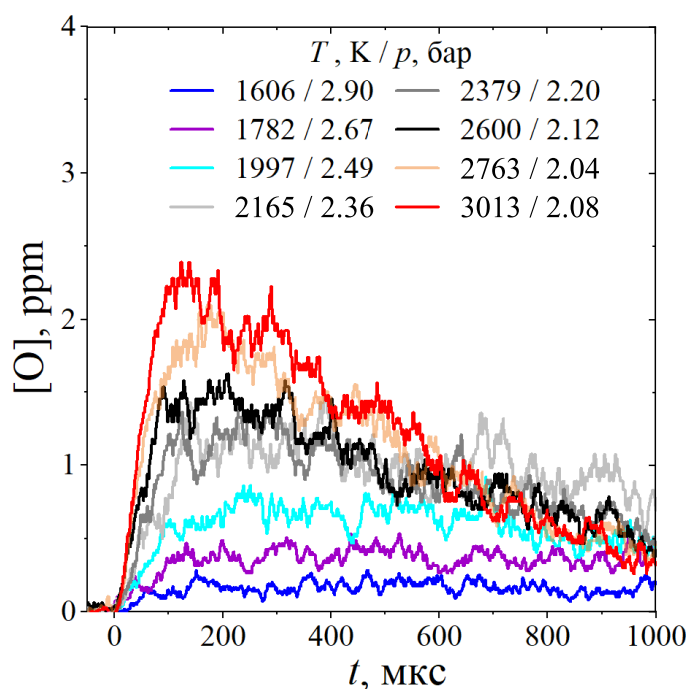


Рисунок 2. Экспериментальные профили мольных долей атомарного кислорода в исследуемых термодинамических условиях.

достижения, ускоряющимся падением мольной доли по мере роста температуры до ~ 3000 К; как видно, время формирования $[O]_{max}$ достигает 100 микросекунд при максимально-исследуемых температурах с потерей более 80% мольной доли атомов кислорода к 1000 мкс.

Каждый эксперимент при соответствующих термодинамических/химических параметрах был смоделирован численно с использованием модели горения 2-пентанола [11]. Расчеты проводились в приближении реактора постоянного давления в программном обеспечении с открытым исходным кодом Cantera [17]. Численные и экспериментальные профили приведены на рисунках 3–5 и, для удобства описания, разделены на относительно низкотемпературные (НТ, 1600–2000 К), среднетемпературные (СТ, 2000–2600 К) и высокотемпературные (ВТ, 2600–3000 К).

При низких температурах кинетическая модель [11] находится в хорошем согласии с экспериментальными данными, с небольшой недооценкой концентрации атомов кислорода, близкой к пределу экспериментальной неопределенности.

СТ-диапазон окисления 2-пентанола описывается хуже. Наблюдаются отклонение предсказаний модели [11] как в начальной динамике образования атомов О (модель недооценивает время образования, значительно теряя в скорости после ~ 100 мкс), так и в динамике расходования кислорода, что отчетливо проявляется при температуре ~ 2600 К. Тем не менее, модель адекватно воспроизводит стационарный уровень концентрации при температурах ~ 2150 – 2400 К.

С дальнейшим ростом температуры модель начинает заметно недооценивать скорость образования атомов О первые 200 мкс, и затем сильно ошибаться в предсказаниях динамики расходования атомов кислорода,

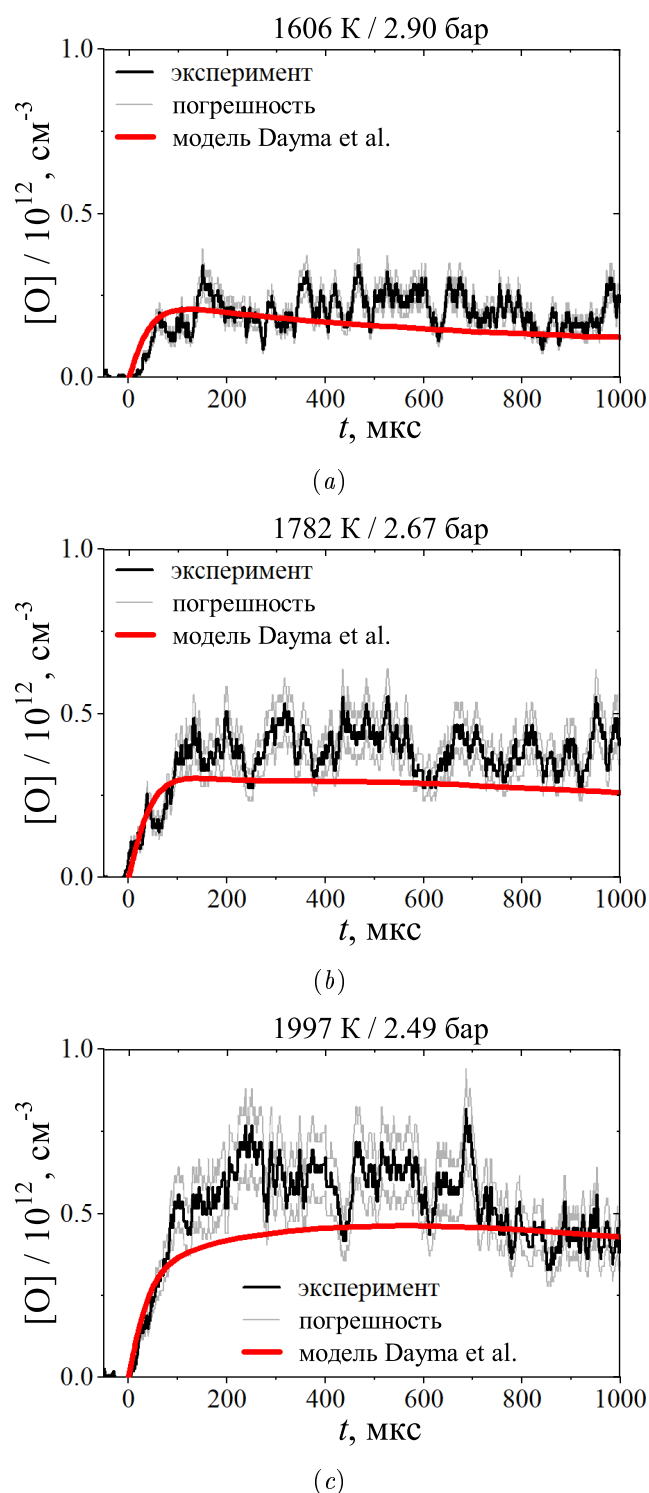
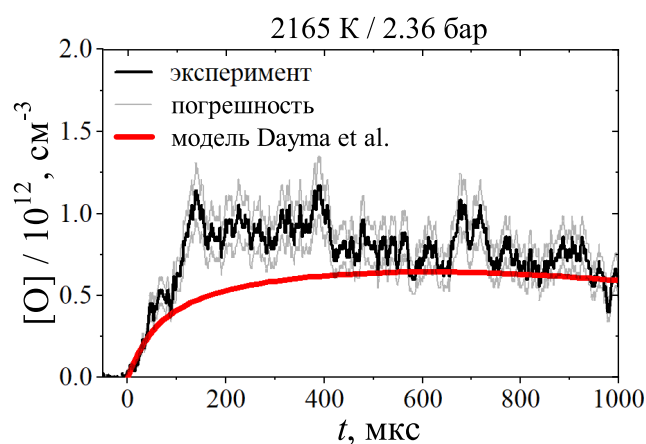


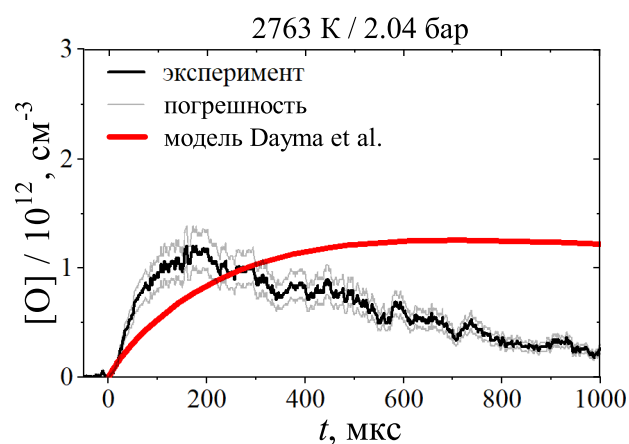
Рисунок 3. Численные и экспериментальные время-разрешенные концентрационные профили образования и потребления атомов О при окислении 2-пентанола, НТ-диапазон.

формируя подобные НТ-/СТ-профилям стационарные уровни концентрации, которых не наблюдается в экспериментах ВТ-диапазона.

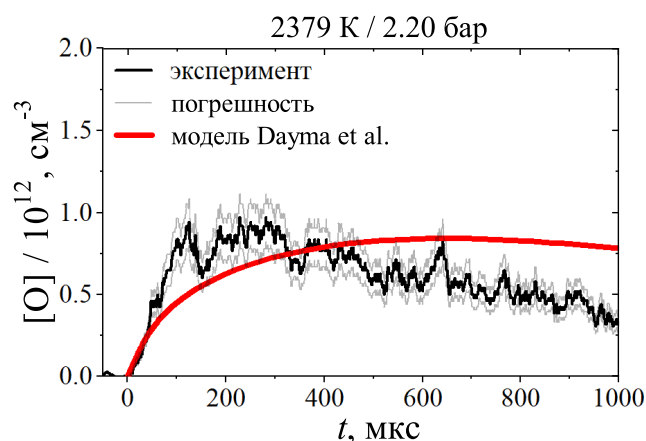
Можно сказать, что модель [11] обладает хорошей прогностической эффективностью представленных экспериментальных данных при ~ 1600 – 2400 К с сильным падением эффективности по мере роста температуры до ~ 3000 К. Справедливо отметить, что модель, насколько



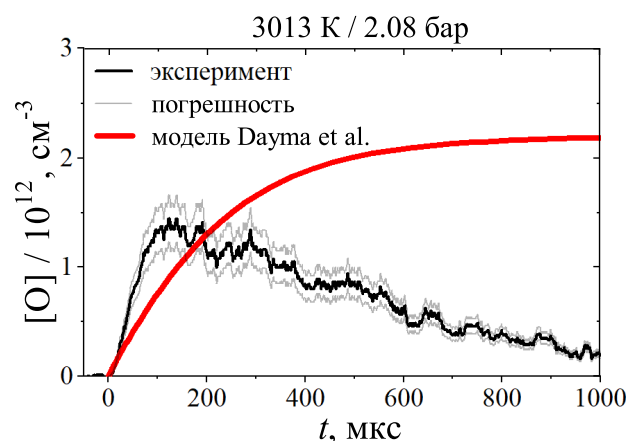
(a)



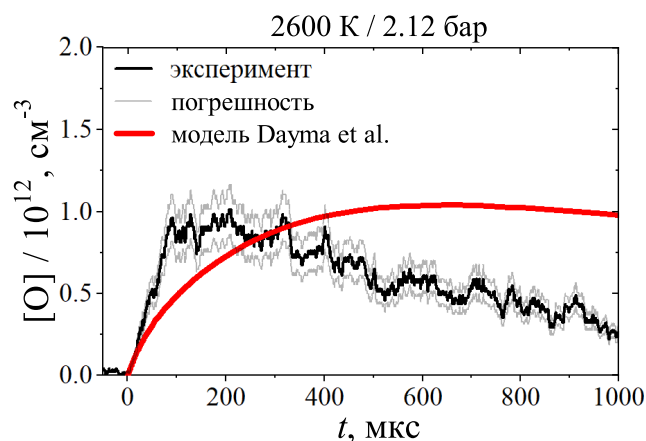
(a)



(b)



(b)



(c)

Рисунок 4. Численные и экспериментальные время-разрешенные концентрационные профили образования и потребления атомов О при окислении 2-пентанола, СТ-диапазон.

известно авторам, до проведения настоящего исследования не тестировалась при температурах более 1500 К, и, следовательно, внесение высокотемпературных поправок скоростей реакций или же самих реакционных путей может стать предметом будущих исследований.

Рисунок 5. Численные и экспериментальные время-разрешенные концентрационные профили образования и потребления атомов О при окислении 2-пентанола, ВТ-диапазон.

3.2. Кинетический анализ

Для определения специфики протекающей кинетики окисления 2-пентанола были проведены интегральные анализы путей образования/расходования атомов О и чувствительности констант скоростей элементарных реакций. Кинетический анализ проводился по полным временным интервалам от 0 до 1000 мкс в соответствующих НТ-, СТ- и ВТ-диапазонах (рисунки 6–8). Коэффициенты чувствительности нормировались на локальную концентрацию атомов О в соответствующей точке расчета. Скорости и коэффициенты чувствительности реакции $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ были опущены для удобства восприятия данных; названия соединения, символы и индексы сохранены согласно записи в оригинальной модели.

Доминирующим каналом образования атомов О является уже упомянутая реакция $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ (не представлена на рисунках 6–8), которая, так или иначе, конкурирует с другими реакциями ветвления $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{O}$ и $\text{H}_2 + \text{O} = \text{H} + \text{OH}$, кинетическая роль которых хорошо известна и обсуждаться не будет; замечен небольшой вклад реакции $\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{CH}_2\text{O} + \text{O}$, растущий по мере роста температуры. Основной вклад в потребление вносит реакция гибели атомов

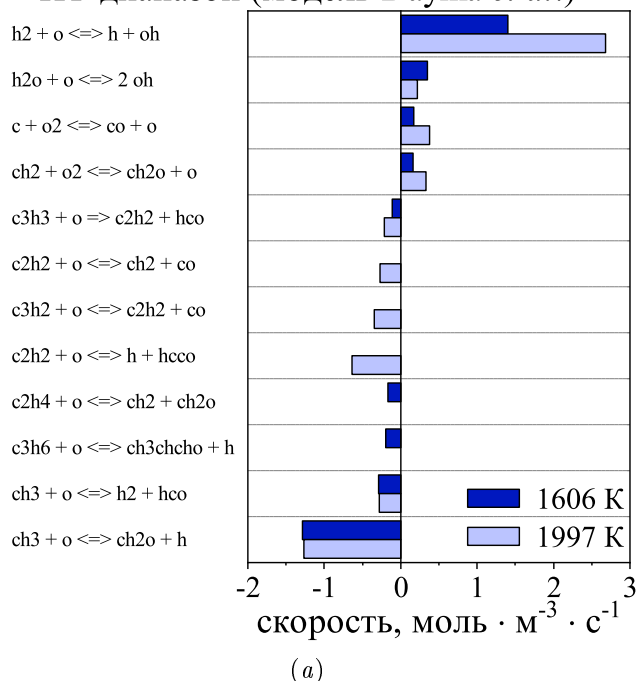
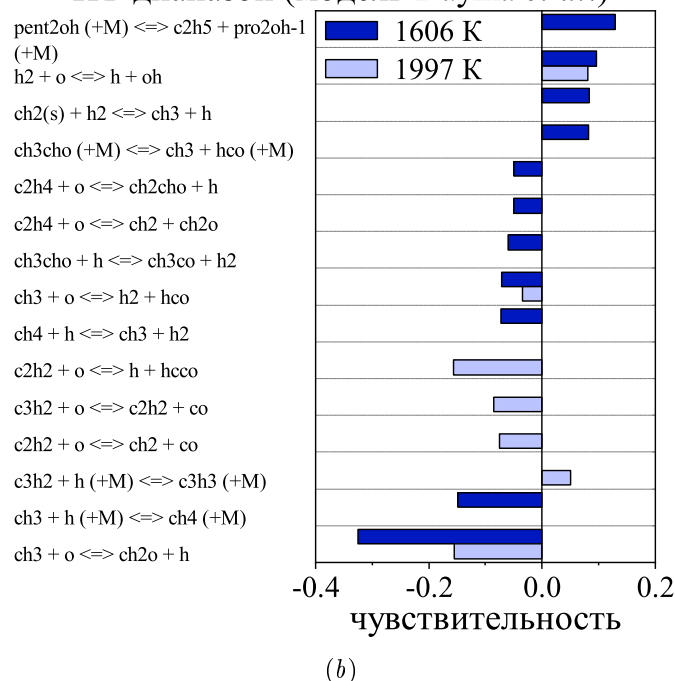
НТ-диапазон (модель Dayma *et al.*)НТ-диапазон (модель Dayma *et al.*)

Рисунок 6. Кинетический анализ при низких температурах; (a) — скорости реакций с образованием и потреблением атомов О; (b) — нормализованные коэффициенты чувствительности констант скоростей элементарных реакций.

кислорода при взаимодействии с метильными радикалами $\text{CH}_3 + \text{O} = \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$; можно увидеть, что с ростом температуры реакции окисления этилена C_2H_4 и пропилена C_3H_6 сменяются окислением более мелких соединений — ацетилена C_2H_2 и циклопропенилидена C_3H_2 .

Чувствительность внутри НТ-диапазона сильно меняется. При ~ 1600 К модель чувствительна к реакциям мономолекулярного разложения 2-пентанола (pent2oh), ацетальдегида CH_3CHO и метана CH_4 , а также кин-

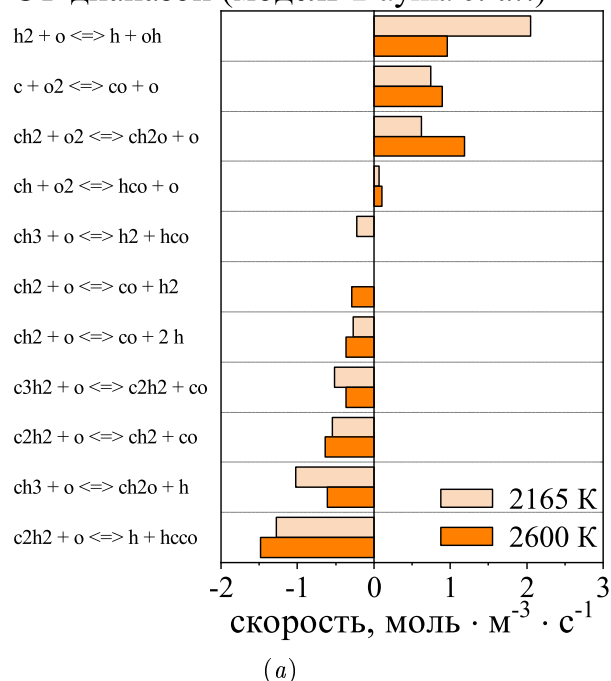
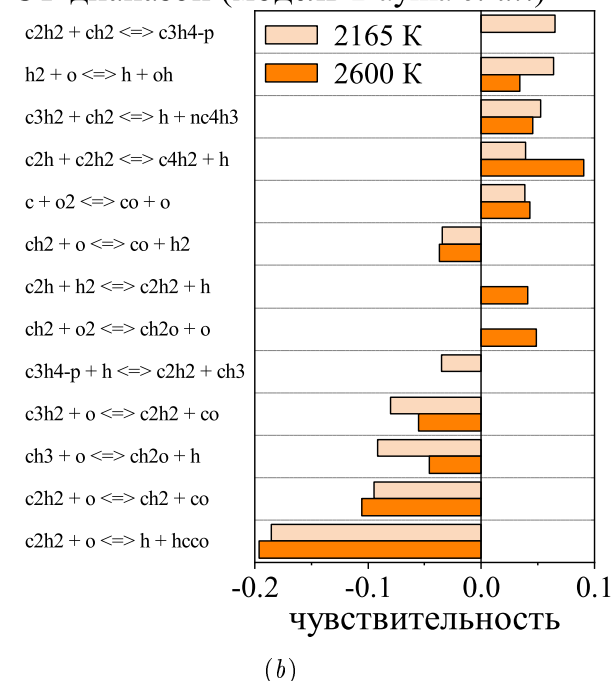
СТ-диапазон (модель Dayma *et al.*)СТ-диапазон (модель Dayma *et al.*)

Рисунок 7. Кинетический анализ при средних температурах; (a) — скорости реакций с образованием и потреблением атомов О; (b) — нормализованные коэффициенты чувствительности констант скоростей элементарных реакций.

тике взаимодействия этих соединений и этилена с радикалами О и Н. При повышении температуры до ~ 2000 К чувствительность переходит к реакциям окисления C_2H_2 и C_3H_2 с заметным падением величины коэффициента для ключевой реакции окисления метильного радикала.

Распределение реакционных путей внутри СТ-диапазона намного более стабильное. В образовании атомов О наблюдается переход влияния от классических

реакций ветвления к реакции окисления метилена CH_2 молекулярным кислородом. В потреблении медленно увеличивается роль каналов окисления ацетилена, а также увеличивается роль окисления метилена атомарным кислородом при потере канала окисления метильного радикала.

При температуре ~ 2150 К отмечается чувствительность модели к кинетике разложения пропаргила C_3H_4 -р и его взаимодействию с радикалами Н, которая полностью переходит в чувствительность к кинетике метилена и этинильного радикала C_2H при ~ 2600 К. Наиболее высокие коэффициенты у реакций окисления ацетилена при небольшой потере чувствительности к реакциям окисления метильного радикала и циклопропенилидена.

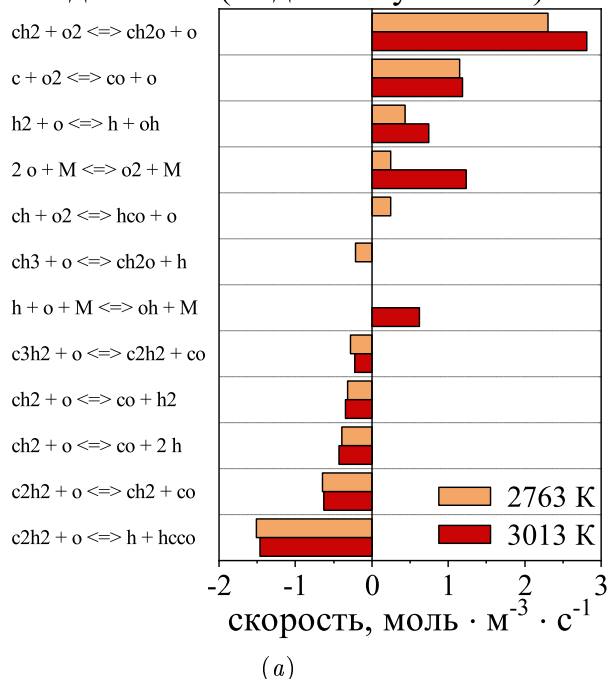
С дальнейшим ростом температуры доминирующим каналом образования становится взаимодействие метилена с молекулярным кислородом, со значительным ростом вклада реакций мономолекулярной диссоциации O_2 и OH внутри ВТ-диапазона. За потребление по-прежнему ответственны ацетилен и метилен, с заметной падающей ролью метильного радикала и циклопропенилидена.

Сохраняется высокая чувствительность к кинетике ацетилена, метилена и этинильного радикала, при значительном падении чувствительности к кинетике метильного радикала; внутри диапазона заметен рост чувствительности к реакциям мономолекулярного разложения H_2O , OH и H_2 до ~ 3000 К.

Следует заключить, что, согласно модели [11], образование атомов кислорода контролируется хорошо известными реакциями ветвления цепи, с перераспределением их влияния по мере роста температуры, где, дополнительно, после ~ 2500 К заметный вклад начинают вносить мономолекулярная кинетика O_2 , H_2O и OH , а также взаимодействие O_2 с радикалом CH_2 . Каналы потребления атомов О значительно меняются в зависимости от температуры: доминирующая роль кинетики радикала CH_3 в НТ-диапазоне, кинетики C_2H_2 и CH_3 в СТ-диапазоне, и кинетики C_2H_2 , C_2H и CH_2 в ВТ-диапазоне.

Модель чувствительна к одной из реакций мономолекулярного разложения 2-пентанола только при низких температурах ~ 1600 К. Следует обратить внимание на реакцию $\text{C}_3\text{H}_4\text{-p} = \text{C}_2\text{H}_2 + \text{CH}_2$, влиятельную в СТ-диапазоне, поскольку подобная запись реакции без эффективного тела M предполагает использование константы скорости в пределе высоких давлений, что может приводить к аномально быстрому разложению пропаргила по мере роста температуры и, более того, значительно влиять на кинетику потребления атомов О, поскольку реакция идет с образованием двух важнейших, согласно кинетическому анализу, соединений — ацетилена и метилена. Реакции окисления ацетилена атомарным кислородом известны достаточно неплохо, их скорости при повышенных температурах верифицированы в нашей недавней работе [18]; реакции взаимодействия CH_2 и C_2H с О и O_2 , тем не менее, требуют проверки, поскольку неопределенность констант скоростей данных реакций высока и требует дополнительных исследований, что также подробно обсуждалось в наших исследованиях [19, 20]. Дополнительно следует сказать, что,

ВТ-диапазон (модель Dayma *et al.*)



ВТ-диапазон (модель Dayma *et al.*)

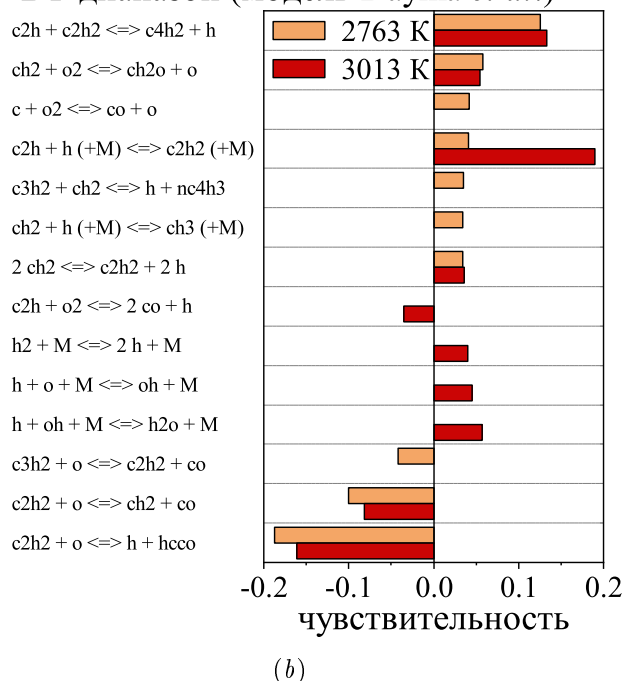


Рисунок 8. Кинетический анализ при высоких температурах; (a) — скорости реакций с образованием и потреблением атомов О; (b) — нормализованные коэффициенты чувствительности констант скоростей элементарных реакций.

поскольку наибольшие расхождения модели [11] с экспериментальными данными проявляются при температуре ~ 2400 К и характерно увеличиваются с ее ростом, в модели могут отсутствовать реакционные пути разложения 2-пентанола (константы скорости, согласно сведениям от авторов модели, рассчитывались и проверялись до 2000 К), активация которых может происходить только при повышенных температурах, приводя к некорректным промежуточным составам смеси

и, как следствие, сильным ошибкам в моделируемых профилях образования и потребления атомарного кислорода, что также было отмечено в работе [21].

Также следует указать, что авторы настоящего исследования не считают правомерным проводить в данной работе модификации кинетической модели Dayma *et al* [11], поскольку это требует повторной проверки модифицированной модели на ранее полученных экспериментальных результатах, что выходит за рамки данной работы. Тем не менее, оригинальные экспериментальные данные с низкой неопределенностью и проведенный кинетический анализ, несомненно, будут полезны для разработчиков в последующих этапах развития моделей горения высокомолекулярных спиртов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель горения спиртов Dayma *et al* была протестирована при температурах 1600–3000 К и давлениях 2–3 бар на новых экспериментальных данных, полученных в процессе окисления 2-пентанола в смеси с молекулярным кислородом в условиях сильного разбавления в аргоне. Впервые, с использованием прецизионного метода атомно-резонансной спектроскопии за ударными волнами, были получены время-разрешенные концентрационные профили образования и потребления важнейших радикалов горения — атомов кислорода. Модель Dayma *et al* показала высокие предсказательные способности при температурах до ~ 2400 К, однако значительно потеряла в точности с повышением температуры до ~ 3000 К. На основе кинетического анализа скоростей образования продуктов было установлено, что образование атомов О контролируется хорошо известными реакциями ветвления цепи, а потребление — кинетикой небольших C_1 – C_2 соединений, среди которых необходимо отметить CH_3 , C_2H_2 , CH_2 и CH . На основе анализа чувствительности констант скоростей элементарных реакций были показаны реакционные пути, требующие дополнительного внимания, среди которых была выделена кинетика мономолекулярного распада C_3H_4 и окисления радикалов CH_2 и C_2H . Дополнительно, рассмотрены возможности повышения точности модели за счет верификации высокотемпературной кинетики мономолекулярной диссоциации 2-пентанола, поскольку существенные отклонения от экспериментальных данных могут быть вызваны отсутствием важных путей разложения и/или их некорректными коэффициентами ветвления. Представленные экспериментальные данные, независимо от кинетического моделирования, могут быть использованы другими исследователями для верификации последующих моделей горения высокомолекулярных спиртов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cai L, Vom Lehn F and Pitsch H 2021 *Energy Fuels* **35** 1890–1917
2. Gaspar D J *et al* 2019 Top Ten Blendstocks For Turbocharged Gasoline Engines: Bioblendstocks With Potential to Deliver the for Highest Engine Efficiency *Report PNNL-28713* (Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory)
3. Nielsen D R, Amarasiwardena G S and Prather K L 2010 *Bioresource Technology* **101** 2762–2769
4. Chen L, Ding S, Liu H, Lu Y, Li Y and Roskilly A P 2017 *Applied Energy* **203** 91–100
5. Yilmaz N and Atmanli A 2017 *Fuel* **210** 75–82
6. Cann A F and Liao J C 2010 *Appl Microbiol Biotechnol* **85** 893–899
7. Kohse-Höinghaus K, Oßwald P, Cool T A, Kasper T, Hansen N, Qi F, Westbrook C K and Westmoreland P R 2010 *Angew Chem Int Ed* **49** 3572–3597
8. Li Q, Hu E, Zhang X, Cheng Y and Huang Z 2013 *Energy Fuels* **27** 1141–1150
9. Köhler M, Kathrotia T, Oßwald P, Fischer-Tammer M L, Moshhammer K and Riedel U 2015 *Combustion and Flame* **162** 3197–3209
10. Bai J, Zhu Y, Zhou C W, Dayma G, Serinyel Z and Dagaut P 2021 *Proceedings of the Combustion Institute* **38** 823–832
11. Dayma G, Serinyel Z, Carbonnier M, Bai J, Zhu Y, Zhou C W, Kéromnès A, Lefort B, Le Moyne L and Dagaut P 2021 *Proceedings of the Combustion Institute* **38** 833–841
12. Curran H J 2019 *Proceedings of the Combustion Institute* **37** 57–81
13. Bystrov N, Emelianov A, Eremin A, Loukhovitski B, Sharipov A and Yatsenko P 2020 *Combustion and Flame* **218** 121–133
14. Capriolo G, Bystrov N, Emelianov A, Eremin A, Yatsenko P and Konnov A 2021 *Fuel* **287** 119499
15. Gaydon A G and Hurle I R 1963 *The Shock Tube in High-temperature Chemical Physics* (Chapman and Hall)
16. Bystrov N, Emelianov A, Eremin A and Yatsenko P 2023 *Combustion and Flame* **258** 113096
17. Goodwin D G, Moffat H K, Schoegl I, Speth R L and Weber B W 2023 Cantera: An Object-oriented Software Toolkit for Chemical Kinetics, Thermodynamics, and Transport Processes URL <https://zenodo.org/record/8137090>
18. Alekseev V A, Bystrov N, Emelianov A, Eremin A, Yatsenko P and Konnov A A 2022 *Combustion and Flame* **238** 111924
19. Bystrov N, Emelianov A, Eremin A and Yatsenko P 2024 *Heat Trans Res* **56** 31–52
20. Быстров Н С, Емельянов А В, Еремин А В и Яценко П И 2021 *Горение и взрыв* **14** 30–45
21. Быстров Н С, Емельянов А В, Еремин А В и Яценко П И 2023 *Вестник ОИВТ РАН* **10** 36–46