

УДК 541.128

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ХОЛОДНОПЛАМЕННОГО ОКИСЛЕНИЯ ПРОПАНА В ОБЛАСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

© 2025 г. М. Дж. Погосян¹, Н. М. Погосян¹, С. Д. Арсентьев¹,
Л. Н. Стрекова², В. С. Арутюнов^{2*}

¹Институт химической физики им. А.Б. Налбандяна Национальной Академии наук Республики Армения,
Ереван, Республика Армения

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: v_arutyunov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024

После доработки 18.06.2024

Принята в печать 20.06.2024

Экспериментально показана возможность холодного пламенного режима окисления пропан-кислородных смесей $C_3H_8:O_2$ в соотношении от 1:3 до 1:1, который сопровождается проявлением области отрицательного температурного коэффициента (ОТК) скорости реакции. Повышение соотношения $C_3H_8:O_2$ (обогащение смеси пропаном) приводит к расширению диапазона температур существования холодного пламенного режима окисления и смещает область ОТК в сторону более высоких температур. Холоднопламенное окисление пропана сопровождается образованием ряда востребованных нефтехимических продуктов (олефинов, оксигенатов, оксида пропилена), относительным выходом которых можно управлять путем изменения состава смеси и температуры окисления.

Ключевые слова: пропан, парциальное окисление, холодное пламя, отрицательный температурный коэффициент, скорость реакции, этилен, пропилен, оксигенаты.

DOI: 10.31857/S0207401X25020072

ВВЕДЕНИЕ

Парциальное окисление углеводородов при умеренных температурах становится все более актуальным направлением в связи с усилиями по минимизации выбросов диоксида углерода при получении энергии, а также в связи с потребностью в новых технологиях переработки углеводородного сырья. Это стимулирует интерес к исследованию механизма процессов парциального окисления углеводородов для его уточнения и поиска путей более эффективного использования легких углеводородов, входящих в состав природного газа, как в энергетике, так и для получения востребованных кислородсодержащих соединений и олефинов [1], являющихся сырьем для производства множества продуктов нефтегазохимии. В данной области все еще остается ряд серьезных проблем: например, до сих пор нет ясности в вопросе о механизме возникновения холодных пламен (ХП) и явления отрицательного температур-

ного коэффициента (ОТК) скорости реакции при окислении легких углеводородов. Анализ экспериментальных результатов исследований холодных пламен при окислении углеводородов, полученных на начальном этапе изучения этого явления и обобщенных в фундаментальной монографии [2], а также в более поздних работах [3–9], свидетельствует о том, что в их детальном механизме, существенно влияющем на процессы воспламенения, горения и переработки углеводородов, все еще остается много неясного. Об этом же говорят и результаты кинетического моделирования явлений ХП и ОТК в пропане [10, 11]. Поэтому исследования, направленные на уточнение и верификацию детального механизма окисления легких углеводородов при умеренных температурах, широко ведутся в настоящее время.

Пропан занимает особое место в ряду алканов, будучи переходным звеном между первыми нетипичными членами этого гомологического ряда —

метаном и этаном – и типичными алканами, содержащим CH_2 -группу. Он также широко используется в качестве транспортного и бытового топлива и нефтехимического сырья, поэтому процессам его окисления и окислительного крекинга в последнее время уделяется большое внимание. Исследовано влияние концентрации молекулярного кислорода на окислительный крекинг пропана [12] и роль реакций на поверхности реактора в этом процессе [13]. Исследованы закономерности окисления богатых смесей пропана [14]. Проведено кинетическое моделирование этого процесса [15], включая анализ поверхности потенциальной энергии реакций в системе, содержащей *i*-пропильный и *n*-пропильный радикалы [16]. Рассмотрены процессы сопряженного окисления пропана в присутствии других легких углеводородов, прежде всего этилена [17, 18].

Фундаментальное значение имеет исследование окисления пропана в режиме холодных пламен и в области ОТК, где можно ожидать сильного влияния небольших изменений в условиях процесса на состав и выход наиболее ценных продуктов, прежде всего олефинов и оксигенатов [19, 20]. Однако исследование окислительных процессов в этом режиме связано со значительными экспериментальными трудностями. Из-за малой продолжительности холоднопламенной вспышки возникают проблемы с анализом продуктов, образовавшихся в этот период. Поэтому при проведении экспериментов в статических условиях состав реагирующей смеси определялся только до возникновения холодного пламени или после завершения этого процесса.

В работе [21] стабилизации фронта холодного пламени в проточных условиях удалось добиться за счет использования конического реактора с переменной скоростью потока. Однако введение зонда для отбора проб в область узкого фронта холодного пламени заметно нарушало его структуру. Разработанная [22–24] методика стабилизации холодного пламени в проточных условиях позволила подойти к анализу продуктов непосредственно в условиях ХП и ОТК. В цитируемых работах стабилизированные холодные пламена (СХП) были получены в двухсекционном проточном реакторе при окислении пропана, пропилена и бутана. Следует отметить, что авторы этих работ исследовали СХП только для эквимолярных составов исходной смеси.

В проведенных нами ранее экспериментальных исследованиях ХП при окислении пропана [19, 20] было показано, что, при температуре 350 °С по мере повышения соотношения пропан/кислород в исходной смеси $\text{C}_3\text{H}_8:\text{O}_2$ от 0.2 до 6.0 интенсивность свечения и саморазогрев стабилизированного холодного пламени достигают максимума в эквимолярной смеси $\text{C}_3\text{H}_8:\text{O}_2 = 1:1$. В данной работе исследовали температурную зависимость выхода продуктов стабилизированного холодного пламени бедных смесей $\text{C}_3\text{H}_8:\text{O}_2$ в соотношении от 1:3 до 1:1 в интервале температур 330–410 °С, включающем область ОТК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования холоднопламенного режима окисления пропана использовали модернизированную методику двухсекционного проточного реактора, подробно описанную в работах [5, 22]. Реактор представлял собой два кварцевых цилиндра диаметром 45 мм, соединенных между собой перегородкой. Длина первой и второй секций реактора составила 160 и 170 мм соответственно. С целью разделения процессов, протекающих в секциях реактора, и предотвращения диффузии продуктов реакции из второй секции в первую они были отделены друг от друга перегородкой, представляющей собой пакет кварцевых трубок с внутренним диаметром 3 мм и длиной 40 мм. Реактор был снабжен торцевыми вводами для термодпар, помещенных в кварцевые чехлы, предварительно пассивированные борной кислотой. Через эти же отводы, без нарушения герметичности реактора, отбирали пробы для хроматографического анализа продуктов реакции. Температура в первой секции реактора поддерживалась постоянной и составляла 280 °С, а во второй она варьировалась в интервале 330–410 °С. Все измерения проводили после установления стационарного режима процесса. Визуальное наблюдение осуществлялось через смотровое окно. В отсутствие нагрева первой секции реактора стабилизированное ХП пропана получать не удавалось.

Наиболее устойчивое и стабильное холодное пламя пропана устанавливалось при температуре 350 °С и давлении 340 Торр. Наличие холодного пламени определяли по саморазогреву смеси во второй секции реактора. В связи с этим эксперименты проводили следующим образом: в реактор,

при давлении 340 Торр и температуре во второй секции 350 °С подавали пропан-кислородную смесь $C_3H_8:O_2$ состава 1:1 и после возникновения и стабилизации холодного пламени проводили анализ состава продуктов реакции. Затем, не останавливая потока, в подаваемой в реактор смеси реагентов C_3H_8 и O_2 постепенно изменяли содержание кислорода до достижения требуемого их соотношения. После достижения стационарного состояния температуру во второй секции реактора варьировали от 330 до 410 °С изменением нагрева печи. Все эксперименты проводили при давлении 340 Торр и времени пребывания смеси во второй секции реактора 18.2 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты показали, что в стехиометрической смеси $C_3H_8:O_2$ состава 1:5 холодное пламя получить не удастся, а в этой же смеси состава 1:4 холодное пламя, возникающее во второй секции реактора, неустойчиво. В связи с этим исследовали влияние температуры на конверсию пропана и выход основных продуктов реакции только в смесях $C_3H_8:O_2$ состава 1:1, 1:2 и 1:3. Полученные экспериментальные результаты представлены в табл. 1–3.

Наиболее широкий спектр продуктов был зафиксирован в смеси $C_3H_8:O_2$ состава 1:1, которой соответствует минимальная для данных экспериментов концентрация кислорода. Он включает оксиды углерода, водород, метан, этилен, пропилен и ряд оксигенатов (метанол, формальдегид, ацетальдегид, оксид пропилена). Кроме указанных в табл. 1 продуктов, при $T = 350\text{--}360$ °С были обнаружены также следы этана.

Таблица 1. Зависимость изменения парциального давления (Торр) пропана и основных продуктов реакции от температуры для смеси $C_3H_8:O_2$ состава 1:1

$T, ^\circ C$	$\Delta[C_3H_8]$	[CO]	[CO ₂]	[H ₂]	[CH ₄]	[C ₂ H ₄]	[C ₃ H ₆]	[CH ₃ OH]	[CH ₂ O]	[CH ₃ CHO]	[C ₃ H ₆ O]
334	51.0	46.4	9.1	11.7	0.5	3.1	11.3	14.5	11.1	6.3	0.2
343	60.2	53.4	9.9	12.8	0.7	3.8	13.1	17.1	13.3	7.5	0.8
350	65.8	58.0	10.4	13.0	0.8	4.3	14.6	18.8	14.4	8.0	1.2
361	67.1	59.0	10	11.0	0.8	4.7	17.0	18.8	13.6	7.8	1.5
371	63.5	54.2	8.5	8.5	0.64	4.8	18.0	14.5	11.4	6.5	1.6
381	52.0	45.0	5.9	6.0	0.5	4.9	17.9	9.5	8.0	4.5	1.7
387	42.0	36.5	4.5	4.5	0.4	4.3	15.2	7.0	6.2	3.3	1.4
395	28.5	25.1	2.8	2.8	0.2	3.0	10.1	4	3.6	2.0	1.0
410	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

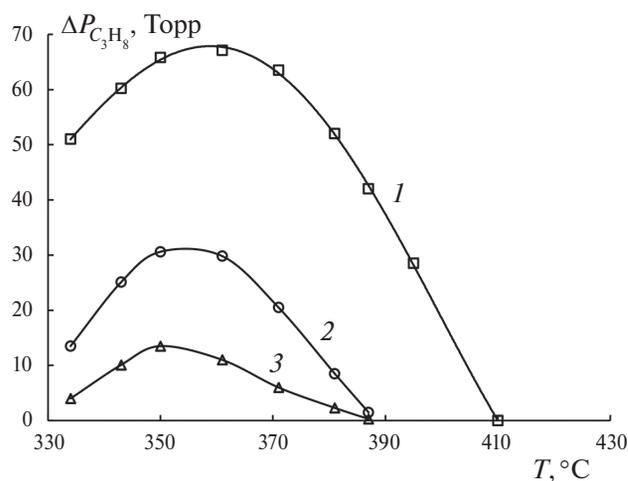


Рис. 1. Зависимость изменения парциального давления пропана от температуры в смесях $C_3H_8:O_2$ различных составов: 1 – 1:1; 2 – 1:2; 3 – 1:3.

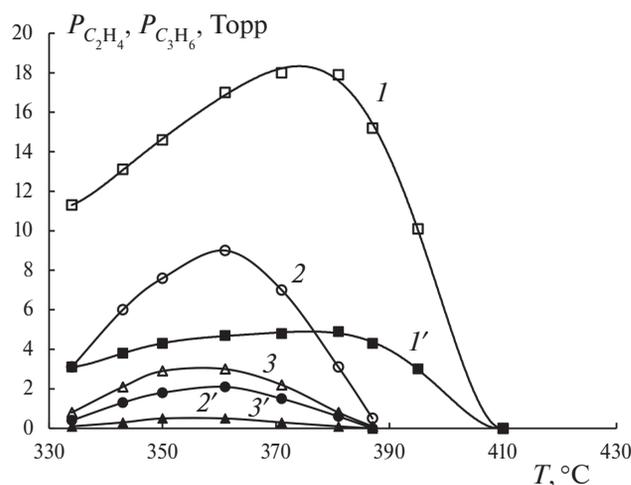


Рис. 2. Зависимость парциального давления этилена ($1', 2', 3'$) и пропилена ($1, 2, 3$) от температуры в смесях $C_3H_8:O_2$ различных составов: 1, $1'$ – 1:1; 2, $2'$ – 1:2; 3, $3'$ – 1:3.

Таблица 2. Зависимость изменения парциального давления (Торр) пропана и основных продуктов реакции от температуры для смеси $C_3H_8:O_2$ состава 1:2

$T, ^\circ C$	$\Delta[C_3H_8]$	[CO]	[CO ₂]	[H ₂]	[C ₂ H ₄]	[C ₃ H ₆]	[CH ₃ OH]	[CH ₂ O]	[CH ₃ CHO]
334	13.5	5.8	1.6	3.3	0.4	3.1	5.5	5.1	3.1
343	25.1	20.1	4.5	4.1	1.3	6.0	7.8	6.5	4.0
350	30.6	28.3	5.9	4.4	1.8	7.6	8.2	6.7	4.3
361	29.8	27.7	5.3	2.5	2.1	9.0	5.9	5.6	4.2
371	20.5	15.8	2.7	1.5	1.5	7.0	3.5	3.4	2.6
381	8.5	2.6	0.0	0.6	0.6	3.1	1.4	1.3	0.9
387	1.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.5	0.2	0.2	0.

Таблица 3. Зависимость изменения парциального давления (Торр) пропана и основных продуктов реакции от температуры для смеси $C_3H_8:O_2$ состава 1:3

$T, ^\circ C$	$\Delta[C_3H_8]$	[CO]	[CO ₂]	[H ₂]	[C ₂ H ₄]	[C ₃ H ₆]	[CH ₃ OH]	[CH ₂ O]	[CH ₃ CHO]
334	4.0	1.9	0.3	1.0	0.1	0.8	2.6	2.6	1.5
343	10.1	7.0	1.1	1.4	0.3	2.1	3.4	3.3	2.0
350	13.5	10.0	1.4	1.5	0.5	2.9	3.6	3.3	2.2
361	11.0	9.3	1.2	0.8	0.5	3.0	2.3	2.3	1.8
371	6.0	4.6	0.6	0.5	0.3	2.2	1.3	1.5	1
381	2.3	0.7	0.0	0.2	0.1	0.8	0.5	0.5	0.3
387	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0

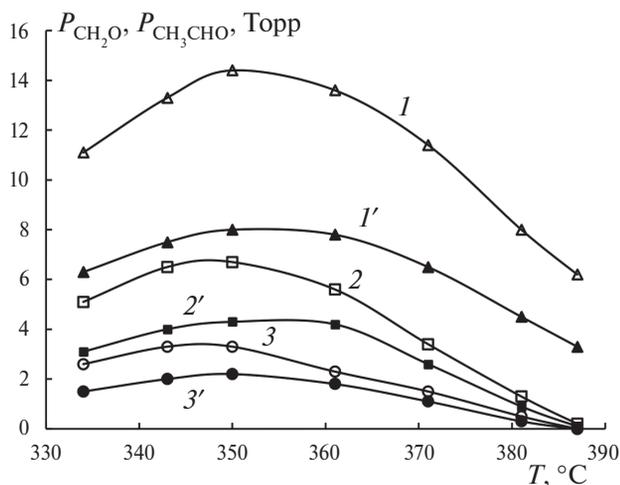


Рис. 3. Зависимость парциального давления формальдегида (1, 2, 3) и ацетальдегида (1', 2', 3') на выходе из реактора от температуры в смесях $C_3H_8:O_2$ различных составов: 1, 1' — 1:1; 2, 2' — 1:2; 3, 3' — 1:3.

По мере перехода к более бедным смесям (понижения соотношения $C_3H_8:O_2$) состав продуктов становится беднее. В продуктах окисления смесей $C_3H_8:O_2$ составов 1:2 и 1:3 уже отсутствуют метан и оксид пропилена, которые обнаруживали при окислении смеси $C_3H_8:O_2$ состава 1:1. Заметно снижается и выход оксигенатов.

Таким образом, результаты, представленные в табл. 1–3, показывают существенное влияние

соотношения реагентов в исходной смеси на состав продуктов холодного пламенного окисления пропана, прежде всего на снижение выхода легких алканов метана и этана, а также оксида пропилена по мере повышения содержания кислорода в смеси.

На рис. 1–4 представлены температурные зависимости изменения парциального давления пропана и продуктов реакции на выходе из реактора для различных составов исходной смеси. Как видно из рис. 1, для всех составов смеси повышение температуры сначала приводит к увеличению конверсии пропана, а затем — к ее снижению, т.е. к явному проявлению эффекта ОТК. При $T > 410 ^\circ C$ наблюдается полное погасание пламени. Максимальный расход пропана наблюдается в диапазоне температур 350–360 °C. При этом понижение соотношения $C_3H_8:O_2$ в исходной смеси (переход к более бедным смесям) приводит к снижению конверсии пропана и смещению области ОТК в сторону более низких температур.

Зависимость парциального давления олефинов и кислородсодержащих продуктов реакции на выходе из реактора от температуры, полученные для различных составов исходной смеси представлена на рис. 2–4. Максимальный выход олефинов заметно смещен в область более высоких температур по сравнению с температурой максимальной

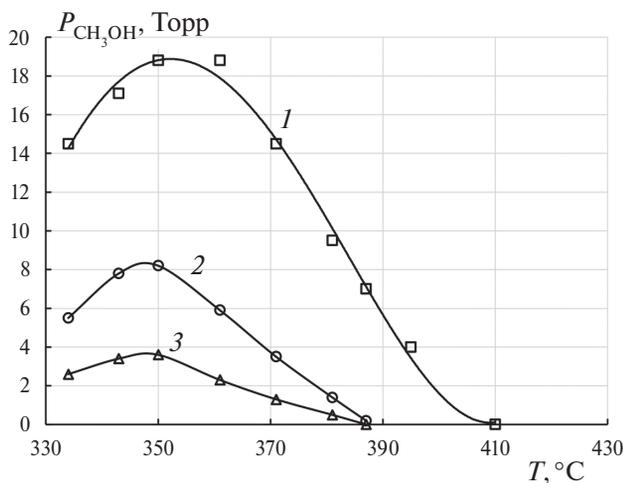


Рис. 4. Зависимость парциального давления метанола на выходе из реактора от температуры в смесях $C_3H_8:O_2$ различных составов: 1 – 1:1; 2 – 1:2; 3 – 1:3.

конверсии пропана, причем максимальный выход этилена достигается при более высокой температуре, чем выход пропилена (рис. 2), что вполне естественно, учитывая его более высокую стабильность в этих условиях. Напротив, температура максимального выхода оксигенатов (формальдегида (рис. 3) и метанола (рис. 4)) практически совпадает с температурой максимальной конверсии пропана. Таким образом, при повышении температуры конверсия пропана и выход кислородсодержащих продуктов окисления достигают максимума при температуре 350–360 °C, а выход олефинов – пропилена и этилена, а также оксида пропилена достигает максимума – при температуре ~380 °C. Это открывает возможность определенной оптимизации выхода различных характерных групп продуктов парциального окисления пропана при его холоднопламенном окислении за счет выбора температуры процесса.

Полученные результаты демонстрируют возможность не только организации стабильного холоднопламенного окисления пропана в условиях проточного реактора и получения в этих условиях большого набора востребованных нефтехимических продуктов (олефинов, оксигенатов, оксида пропилена), но и управления составом получаемых продуктов и исходной смеси и температурой процесса. Температурную область стабилизированного холодного пламени пропана для всех исследованных составов можно разделить на три диапазона: область положительного температурного коэффициента скорости реакции ($T < 330\text{--}350$ °C), нулевого температурного коэф-

фициента (НТК) скорости реакции ($T \sim 350\text{--}370$ °C), в котором скорость процесса практически не зависит от температуры, и область ОТК ($T > 370$ °C). При этом уменьшение соотношения $C_3H_8:O_2$ (переход к более бедным смесям) приводит к сужению областей СХП и ОТК, и при $C_3H_8:O_2$ состава 1:3 область НТК практически отсутствует. Дальнейшие исследования должны быть направлены на анализ возможности повышения выхода востребованных нефтехимических продуктов, образующихся в режиме холоднопламенного окисления пропана, необходимых для этого условий и перспектив практического применения этого процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана возможность стабилизации холодных пламен в пропан-кислородных смесях $C_3H_8:O_2$ состава от 1:3 до 1:1 и наблюдения в них явления отрицательного температурного коэффициента скорости реакции. Установлено, что повышение соотношения $C_3H_8:O_2$ (обогащение смеси пропаном) приводит к расширению диапазона температур, при которых существует стабилизированное холодное пламя. При этом область ОТК смещается в сторону более высоких температур. В режиме холоднопламенного окисления пропана наблюдается значительный выход ряда востребованных нефтехимических продуктов (олефинов, оксигенатов, оксида пропилена), управлять относительным выходом которых можно посредством изменения состава смеси и температуры окисления.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института химической физики им. А.Б. Налбандяна Национальной Академии наук Республики Армения и Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Погосян Н.М., Погосян М. Дж., Шаповалова О.В. и др. // Технологическое горение / Под общей ред. Алдошина С.М., Алымова М.И. М.: Российская академия наук, 2018. С. 114. <https://doi.org/10.31857.S9785907036383000025>*
2. *Shtern V. Ya. Oxidation of Hydrocarbons, Oxford, London, New York: Pergamon Press, 1964. eBook ISBN: 9781483185071.*
3. *Степанский Я.Ю., Яблонский Г.С., Быков В.И. // Физика горения и взрыва. 1982. Т.18. № 1. С. 57.*

4. *Arutyunov V.S., Basevich V.Ya., Vedeneev V.I., Sokolov O.V.* // *Kinet. and Catal.* 1995. V. 36. P. 458.
5. *Гукасян П.С., Манташян А.А., Саядян Р.А.* // *Физика горения и взрыва.* 1976. Т. 12. № 5. С. 789.
6. *Киселёв Ю.В.* Исследование реакций холоднопламенного окисления углеводородов с целью создания нового экспресс анализатора детонационной стойкости бензинов // Дис. ... канд. тех. наук. М.: ОАО "ВНИИ НП", 2006.
7. Unusual «cool flames» discovered aboard International Space Station. <https://beta.nsf.gov/news/unusual-cool-flames-discovered-aboard-international-space-station>
8. *Jie Liu, Ruiguang Yu, Biao Ma* // *ACS Omega* 2020. V. 5. P. 16448. <http://pubs.acs.org/journal/acsodf>
9. *Belyaev A.A., Arutyunov A.V., Arutyunov V.S.* // *Combust. and Explosion.* 2022. V. 15. № 4. P. 19. <https://doi.org/10.30826/CE22150403>
10. *Bashkirtseva I., Slepukhina E.* // *Phil. Trans. Roy. Soc. A.* 2022. V. 380: 20200314. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0314>
11. *Kuang C. Lin, Chuang-Te Chiu* // *Fuel.* 2017. V. 203. P. 102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.064>
12. *Погосян Н.М., Погосян М.Дж., Арсентьев С.Д., Стрекова Л.Н. и др.* // *Хим. физика.* 2015. Т. 34. № 4. С. 29. <https://doi.org/10.7868/S0207401X15040147>
13. *Паланкоева А.С., Беляев А.А., Арутюнов В.С.* // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 6. С. 7. <https://doi.org/10.31857/S0207401X22060097>
14. *Брюков М.Г., Беляев А.А., Захаров А.А., Арутюнов В.С.* // *Кинетика и катализ.* 2022. Т. 63. № 6. С. 736. <https://doi.org/10.31857/S045388112206003X>
15. *Арсентьев С.Д., Тавадян Л.А., Брюков М.Г. и др.* // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 11. С. 3. <https://doi.org/10.31857/S0207401X22110024>
16. *Дагтян А.Г., Манукян З.О., Арсентьев С.Д., Тавадян Л.А., Арутюнов В.С.* // *Хим. физика.* 2023. Т. 42. № 4. С. 20. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23040052>
17. *Погосян Н.М., Погосян М.Дж., Арсентьев С.Д. и др.* // *Нефтехимия.* 2016. Т. 56. № 6. С. 612. <https://doi.org/10.7868/S0028242116060174>
18. *Арсентьев С.Д., Дагтян А.Г., Манукян З.О. и др.* // *Хим. физика.* 2024. Т. 43. № 1. С. 39. <https://doi.org/10.31857/S0207401X24010044>
19. *Погосян Н.М., Погосян М.Дж., Арсентьев С.Д., Стрекова Л.Н., Арутюнов В.С.* // *Хим. физика.* 2023. Т. 42. № 9. С. 47. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2309008X>
20. *Погосян Н.М., Погосян М.Дж., Дагтян А.Г. и др.* // *Хим. физика.* 2024. Т. 43. № 5. С. 76. <https://doi.org/10.1134/S1990793124>
21. *Carlier M., Sochet L.-R.* // *Combust and Flame,* 1978. V. 33. № 1–4. P. 1. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(78\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(78)90039-1)
22. *Манташян А.А., Гукасян П.С.* // *ДАН СССР.* 1977. Т. 234. № 2. С. 379.
23. *Pogosyan M.J., Aliev R.K., Mantashyn A.A.* // *React. Kinet. Cat. Lett.* 1985. V. 27. № 2. P. 437.
24. *Simonyan T.R., Mantashyan A.A.* // *Kinet. Cat. Lett.* 1981. V. 17. № 3–4. P. 319.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE YIELD OF PRODUCTS OF COOL-FLAME OXIDATION OF PROPANE IN THE REGION OF NEGATIVE TEMPERATURE COEFFICIENT

M. J. Pogosyan¹, N. M. Pogosyan¹, S. D. Arsentiev¹, L. N. Strekova², V. S. Arutyunov^{2*}

¹*Nalbandian Institute of Chemical Physics Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia*

²*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: v_arutyunov@mail.ru

The possibility of a cool-flame oxidation of propane-oxygen mixtures of the composition $C_3H_8:O_2 =$ from 1:3 to 1:1, which is accompanied by the phenomenon of a region of negative temperature reaction rate coefficient (NTC), has been experimentally demonstrated. An increase in the $C_3H_8:O_2$ ratio (enrichment of the mixture with propane) leads to an expansion of the temperature range for the existence of the cool-flame oxidation regime and shifts the NTC region towards higher temperatures. Cool-flame oxidation of propane is accompanied by the formation of a number of popular petrochemical products (olefins, oxygenates, propylene oxide), the relative yield of which can be controlled by changing the composition of the mixture and the oxidation temperature.

Keywords: propane, partial oxidation, cold flame, negative temperature coefficient of reaction rate, ethylene, propylene, oxygenat.

REFERENCES

1. N.M. Poghosyan, M.Dj. Poghosyan, O.V. Shapovalova et al. *Technological Combustion*. Eds. S.M. Aldoshin, M.I. Alimov, V.S. Arutyunov et al. 2018. Moscow. Russian Academy of Sciences. P. 114. ISBN 978-5-907036-38-3.
<https://doi.org/10.31857/S9785907036383000005>
2. V.Ya. Shtern. *Oxidation of Hydrocarbons*, Pergamon Press, Oxford, London, New York, 1964. 720 P. eBook ISBN: 9781483185071
3. Ya.Yu. Stepankii, G.S. Yablonskii, V.I. Bykov. *Combustion, Explosion and Shock Waves* **18**(1), 4 (1982).
<https://doi.org/10.1007/BF00783930>
4. V.S. Arutyunov, V.Ya. Basevich, V.I. Vedenev, O.V. Sokolov, *Kinetics and Catalysis* **36**, 458 (1995).
5. P.S. Ghukasyan, A.A. Mantashyan, R.A. Sayadyan. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* **12**(5), 789 (1976).
6. Yu.V. Kiselev. "Investigation of reactions of cold-flame oxidation of hydrocarbons in order to create a new express analyzer of detonation resistance of gasoline" // dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Moscow 2006. specialty of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 05.17.2007.
7. Unusual "cool flames" discovered aboard International Space Station. <https://beta.nsf.gov/news/unusual-cool-flames-discovered-aboard-international-space-station>
8. Jie Liu, Ruiguang Yu, Biao Ma // *ACS Omega* **5**, 16448 (2020). <http://pubs.acs.org/journal/acsodf>
9. A.A. Belyaev, A.V. Arutyunov, V.S. Arutyunov. *Combustion and explosion* **15**(4), 19 (2022).
<https://doi.org/10.30826/CE22150403>
10. I. Bashkirtseva, E. Slepukhina. "Variability of complex oscillatory regimes in the stochastic model of cold-flame combustion of a hydrocarbon mixture" // *Phil. Trans. R. Soc. A* **380**, 20200314 (2022).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0314>
11. Kuang C. Lin, Chuang-Te Chiu. *Fuel* **203**, 102 (2017).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.064>
12. N.M. Poghosyan, M.Dj. Poghosyan, S.D. Arsentiev, L.N. Strekova, L.A. Tavadyan et al. *Russian Journal of Physical Chemistry B* **9**(2), 231 (2015).
<https://doi.org/10.1134/S199079311502027X>
13. A.S. Palankoeva, A.A. Belyaev, V.S. Arutyunov. *Russ. J. Phys. Chem. B* **16**(3), 399 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122030204>
14. M.G. Bryukov, A.A. Belyaev, A.A. Zakharov, V.S. Arutyunov, *Kinetics and Catalysis* **63**(6), 653 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S0023158422060039>
15. S.D. Arsentev, L.A. Tavadyan, M.G. Bryukov, A.S. Palankoeva, A.A. Belyaev et al., *Russ. J. Phys. Chem. B* **16**(6), 1019 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122060021>
16. A.H. Davtyan, Z.H. Manukyan, S.D. Arsentev, L.A. Tavadyan, V.S. Arutyunov. *Russ. J. Phys. Chem. B* **17**(2), 336 (2023).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X23040052>
17. N.M. Poghosyan, M.Dj. Poghosyan, L.N. Strekova, L.A. Tavadyan, V.S. Arutyunov. *Russian Journal of Physical Chemistry B* **9**(2), 218 (2015).
18. S.D. Arsentev, A.H. Davtyan, Z.H. Manukyan, L.A. Tavadyan, L.N. Strekova, V.S. Arutyunov. *Russ. J. Phys. Chem. B* **18**(1), 125 (2024).
<https://doi.org/10.1134/S1990793124010020>
19. N.M. Poghosyan, M.Dj. Poghosyan, S.D. Arsentev, L.N. Strekova, V.S. Arutyunov. *Russ. J. Phys. Chem. B* **17**(5), 1130 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1990793123050081>
20. N.M. Poghosyan, M.Dj. Poghosyan, A.H. Davtyan, S.D. Arsentev, L.N. Strekova et al. *Russ. J. Phys. Chem. B* **18**(3) 745 (2024).
<https://doi.org/10.1134/S1990793124700040>
21. M. Carlier, L.-R. Sochet. *Comb. Flame* **33**(1–4), 1 (1978).
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(78\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(78)90039-1)
22. A.A. Mantashyan, P.S. Ghukasyan. *DAN USSR* **234**(2), 379 (1977).
23. M.J. Pogosyan, R.K. Aliev, A.A. Mantashyn. *React. Kinet. Cat. Lett.* **27**(2), 437 (1985).
24. T.R. Simonyan, A.A. Mantashyan. *Kinet. Cat. Lett.* **17**(3–4), 319 (1981).