

Рис. 2. Расчетная амплитудно-частотная характеристика микровихревой матрицы при скорости потока 60 м/с

УДК 621.452.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ СМЕСИ МЕТИЛЦИКЛОГЕКСАН/ВОЗДУХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Матвеев С.С., Самарский университет, г. Самара
Алексеев В.А., Университет города Лунд², Швеция
Чечет И.В., Самарский университет, г. Самара
Матвеев С.Г., Самарский университет, г. Самара
Коннов А.А., Университет города Лунд², Швеция

Авиационный керосин состоит из смеси алканов (50-65%), моно и поли-ароматиков (10-20%) и циклоалканов или парафинов (20-30%) [1,2]. Ламинарная скорость распространения пламени (S_l) для индивидуально-углеводородного компонента характерного классу алканов (n-decane) была ранее определена в работе [3], ароматического углеводорода бензол в работе [4], толуол в [5]. Значительную долю в авиационном керосине

составляют циклоалканы, а их важность и роль в процессе окисления топлива описана в работах [6,7].

Одним из представителей класса циклоалканов является метилциклогексан, изучению которого было проведено достаточно много работ. В работах [8, 9] экспериментально определено время задержки воспламенения, результаты сопоставлены с предсказаниями кинетических моделей. Ji et al [10] экспериментально определили ламинарную скорость пламени метил-, этил-, n-пропил и бутил-циклогексан/воздух при температуре 353К, методом противоточных пламен, провели расчеты с помощью трех кинетических механизмов. Механизм JetSurf 1.1 показал наилучшее предсказание S_L . Law et al [11] определяли скорость пламени циклогексана и метилциклогексана, методом расширяющего сферического пламени при температуре 353К и давлениях до 20 атмосфер. Предсказания JetSurf. 2.0 дали удовлетворительное совпадение для всех топлив и различных давлений. Kumar et al в работе [12] определяли S_L для различных классов углеводородов, типичных для реальных топлив. S_L для метилциклогексана была определена при начальной температуре газа 400К и атмосферном давлении методом противоточных пламен.

Эксперимент проводился на установке по определению ламинарной скорости пламени методом Heat Flux. Смесь метилциклогексан/воздух сжигалась при начальных температурах 298, 353 и 400К и атмосферном давлении, коэффициент избытка топлива ϕ варьировался от 0.7 до 1.5. Чистота используемого топлива была выше 99%, окислитель $O_2 + N_2$ (21%/79%).

В литературе было найдено несколько кинетических механизмов окисления метилциклогексана. В нашей предыдущей работе по изучению бензола и n-декана [4,5] были рассмотрены три механизма, и было показано, что детальная кинетическая схема, разработанная в Politecnico di Milano [12], дает наилучшее согласие с экспериментами. Поэтому этот механизм был выбран для моделирования и в данном исследовании. Второй рассмотренный кинетический механизм - JetSurF 2.0, так как его версии использовались ранее [9,10] для моделирования SL метилциклогексана + воздушного пламени при 353 К. Моделирование предварительно смешанного адиабатического пламени было выполнено с использованием ANSYS Chemkin 18 [13]. Решения были протестированы на сеточную независимость. Количество точек сетки составляло 650-750.

Ламинарная скорость распространения пламени смеси метилциклогексана/воздух определялась при атмосферном давлении и начальных температурах 298, 353 и 400 К. Общая точность составляла около ± 1 см/с. Для начальных температур 353 и 400 К результаты сравнивались с литературными данными [8-10] (рисунок 1). Данных при 353 К, полученные в Лунде и Самаре, находятся в хорошей согласованности друг с другом,

разница в S_L составляет менее 0,7 см / с для всех коэффициентов избытка топлива (ϕ), кроме $\phi = 1$. Сравнивая эти данные с литературными значениями от Ji et al. [9] и Wu et al. [10], полученные результаты соответствуют Ji et al. [9] в бедных смесях, а также Wu et al. [10] в богатых смесях. Так же было установлено, что ни один из двух тестируемых кинетических механизмов не соответствует экспериментальным результатам, полученным с использованием метода теплового потока. При обеих начальных температурах модель PoliMi [12] имеет тенденцию к завышению значений S_L примерно на 3-4 см/с при коэффициенте избытка топлива, соответствующему максимальному значению S_L . Механизм JetSurF 2.0 [11], наоборот, занижает экспериментальные результаты настоящего исследования.

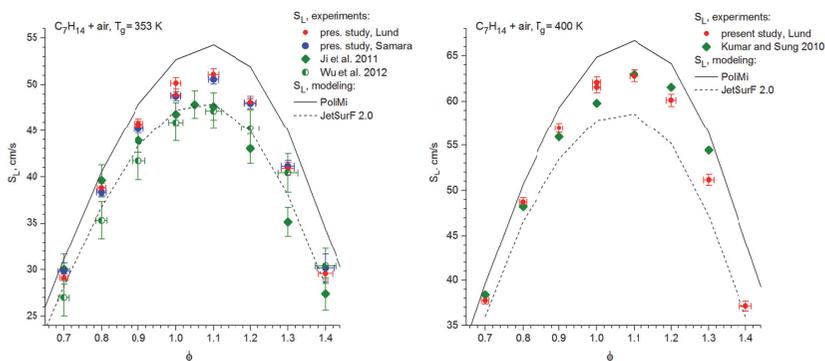


Рис. 1. S_L смеси метилциклогексан/воздух при $T_g = 353$ К (слева) и 400 К (right). Символы: эксперимент, линии: моделирование. Результаты, полученные в Лунде (красные круги) и в Самаре (синие круги), сравниваются с результатами Ji et al. [9] и Wu et al. [10] при 353 К, и Kumar and Sung [8] при 400 К

На рисунке 2 представлены новые экспериментальные данные, измеренные на двух установках в Лунде и Самаре при комнатной температуре ($T_g = 298$ К). Разница в S_L , измеренная на двух установках, составляет 1 см/с, за исключением точек $\phi = 1,0$ и $1,1$, где она достигает 1,2 см/с. Сравнивая результаты с моделированием, те же тенденции можно увидеть при 298 К как для двух более высоких температур (рис. 1). Кроме того, можно видеть общую тенденцию между полученными результатами для метилциклогексана и предыдущими работами над бензолом [5] и н-деканом [4], анализируя предсказания двух схем реакций для суррогатов керосина: PoliMi [12] и JetSurF 2.0 [11]. Для всех трех видов топлива, рассмотренных здесь и в [4, 5], расчеты с JetSurF дают результаты ниже на

5-7 см/с (при максимальном S_L), чем результаты, полученные с помощью модели PoliMi. Тот факт, что существует постоянный сдвиг между двумя моделями, полученный для алканов, циклоалканов и ароматических углеводородов, свидетельствует о том, что причина наблюдаемой разницы заключается в базовых субмеханизмах этих двух моделей. Это соответствует анализу чувствительности, проведенному авторами для бензола + воздушных пламени [5].

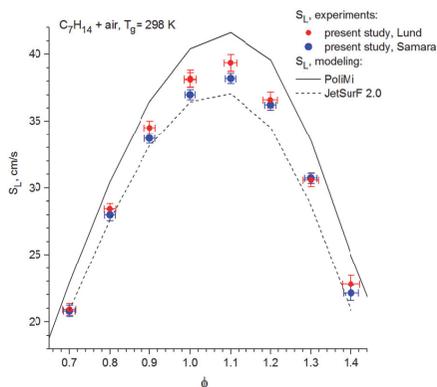


Рис. 2. S_L смеси метилциклогескан/воздух при $T_g = 298$ К.
Символы: экспериментальные результаты, полученные в Лунд (красные круги) и в Самаре (синие круги), линии: моделирование

Данная работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в рамках соглашения № 14.587.21.0033 от 28.07.2016 г. (RFMEFI58716X0033).

Авторы также хотели бы выразить признательность за финансовую поддержку со стороны «Centre for Combustion Science and Technology (CECOST)», Швеция.

Список литературы

1. S. Blakey, L. Rye, C.W. Wilson, Proc. Combust. Inst. 33 (2011) 2863-2885.
2. L. Sileghem, V.A. Alekseev, J. Vancoillie, K.M. Van Geem, E.J.K. Nilsson, S. Verhelst, A.A. Konnov, Fuel 112 (2013) 355-365.
3. L. Sileghem, V.A. Alekseev, J. Vancoillie, E.J.K. Nilsson, S. Verhelst, A.A. Konnov, Fuel 115 (2014) 32-40.

4. *V.A. Alekseev, J.V. Soloviova – Sokolova, S.S. Matveev, I.V. Chechet, S.G. Matveev, A.A. Konnov, Fuel* 187 (2017) 429-434.
5. *J.V. Soloviova – Sokolova, V.A. Alekseev, S.S. Matveev, I.V. Chechet, S.G. Matveev, A.A. Konnov, Fuel* 175 (2016) 302-309.
6. *Y. Yang, A.L. Boehman, J.M. Simmie, Combustion and Flame* 157 (2010) 2357-2368.
7. *S. Dooley, J. Heyne, S.H. Won, P. Dievart, Y. Ju, F.L. Dryer, Energy & Fuels* 28 (2014) 7649-7661.
8. *K. Kumar, C.J. Sung, Energy & Fuels*, 24 (2010) 3840-3849.
9. *C. Ji, E. Dames, B. Sirjean, H. Wang, F.N. Egolfopoulos, Proc. Combust. Inst.* 33 (2011) 971-978.
10. *F. Wu, A.P. Kelley, C.K. Law, Combustion and Flame* 159 (2012) 1417-1425.
11. *H. Wang, E. Dames, B. Sirjean, D.A. Sheen, R. Tango, A. Violi, et al., A high temperature chemical kinetic model of n-alkane (up to n-dodecane), cyclohexane, and methyl-, ethyl-, n-propyl and n-butyl-cyclohexane oxidation at high temperatures, JetSurF version 2.0, September 19, 2010. <<http://web.stanford.edu/group/haiwanglab/JetSurF/JetSurF2.0/index.html>>; 2010.*
12. *High temperature kinetic scheme for Primary Reference Fuels (PRF) + PAH + Real Fuels (Version 1412, December 2014). <<http://creckmodeling.chem.polimi.it/menu-kinetics/menu-kinetics-detailed-mechanisms/menu-kinetics-prf-pah-real-fuels-mechanism>>; 2014.*
13. ANSYS Chemkin-Pro 18.0, Ansys: San Diego, 2017.