

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ МАРКШТЕЙНА ОТ ДОБАВКИ ИНГИБИТОРА В ДЕФОРМИРОВАННОЕ ПЛАМЯ ДИМЕТИЛЭФИРА

А.А. Чернов, К.В. Торопецкий

*ФГБУН Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

*ФГБОУУ Сибирский государственный университет геосистем и технологий
630032, Новосибирск, Россия*

Ключевые моменты, которые привели к современному пониманию природы гидродинамической неустойчивости (DL), начинаются с работ Дарье и Ландау [1, 2], которые рассматривали пламя как бесструктурную поверхность, разделяющую сгоревшие и несгоревшие газы и движущуюся с постоянной скоростью относительно потока и с последующей работы Маркштейна [3] в которой он феноменологически учел в виде поправки на скорость пламени эффекты взаимодействия диффузии, теплопроводности и химических превращений, возникающие во фронте пламени в виде поправки на скорость распространения пламени, названной впоследствии длиной Маркштейна. Нестабильность DL влияет на топологию и скорость распространения ламинарного и турбулентного пламени [4,5]. Нелинейная теория и численное моделирование полностью нелинейной модели показывают, что неустойчивость не приводит непосредственно к турбулентному пламени. Вместо этого образуются характерная топология в виде бугорчатых форм с удлиненными элементами. Когда отношение длины Маркштейна к размеру области уменьшается, эти структуры становятся выше благодаря острым пикам и распространяются на 20% ÷ 50% быстрее скорости плоского ламинарного пламени [5]. Длина Маркштейна непосредственно влияет на локальную скорость горения деформированного пламени и площадь пламени, тем самым этот параметр становится более важным индикатором эффективности действия ингибитора на турбулентное пламя.

В данном докладе представлены результаты измерения зависимости длины Маркштейна от добавки ингибитора в деформированное пламя диметилэфира. Диметилового эфира (СН₃-О-СН₃) является одним из видов экологически чистого топлива, получаемое из природного газа, угля и биомассы. При его использовании в качестве добавки образуется на 90% меньше оксидов азота, чем при использовании чистого дизельного топлива. Также он обладает пониженной склонностью к сажеобразованию, высоким цетановым числом и практически полным отсутствием серьезной дымности отработавших газов. Однако использование диметилового эфира в качестве топлива требует соблюдения мер по обеспечению пожаро- и взрывоопасности, включающих использование эффективных ингибиторов, так как в его смесях с воздухом на свету могут образовываться неустойчивые реакционноспособные перекисные соединения.

Предварительно перемешанное DME-воздушное пламя, стабилизированное на бунзеновской горелке с диаметром сопла 1 см, изучалось методом анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV). Схема установки приведена на рис.1. В статьях [6, 7] приведен краткий обзор и экспериментальные результаты применения используемых нами процедур в исследованиях бунзеновского конусного пламени методом PIV. Показано, что главными источниками погрешности измерений являются ограниченное временное и пространственное разрешение PIV приборов, инерционность и каталитическая способность частиц, трассирующих поток. Эксперименты проводились при температуре от 25 до 55 °С и давлении 748 ÷ 753 мм.рт.ст. Ингибитор в виде триметил-

фосфата (TMP) в горючую смесь добавлялся с помощью шприца и испарителя. Для треновых стробоскопических измерений скорости газового потока в поток воздуха вводили субмикронные частицы TiO_2 , средний размер которых составлял порядка 600 нм. Размер и концентрация измерялись диффузионным аэрозольным счётчиком-спектрометром частиц АЗ-10 [8].

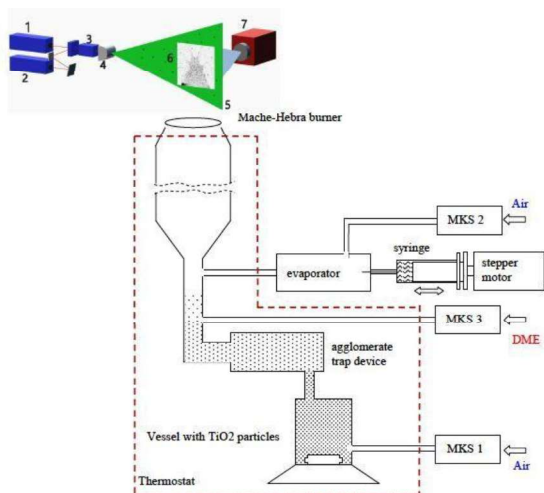


Рис. 1 Схема установки.

Система регистрации и обработки стробоскопических изображений частиц состояла из двух импульсных Nd:YAG лазеров (длина волны 532 нм, длительность импульса 5 нс, энергия импульса 45 мДж), ПЗС камеры (1360×1024 пикселей, размер каждого пикселя 4.65×4.65 мкм) с функцией двухкадровой съемки, оптического объектива Tamron SP AF 180 mm (коэффициент увеличения составлял 0.34, число апертуры было максимальным: $f\# = 32$), синхронизирующего процессора и ПК с программным обеспечением «Actual Flow». По измеренным стробоскопическим изображениям было рассчитано 500 полей мгновенной скорости. Эти измерения использовались для определения зависимости локальной скорости распространения пламени от кривизны фронта пламени. Линейная экстраполяция этих значений к нулевой кривизне определено нами как искомая нормальная скорость распространения пламени. В линейной экстраполяции участвовали только неподверженные дополнительным искажениям значения в области усеченного конуса в соответствии с рекомендациями [9]. Среднеквадратичное отклонение составляло от 0.3 для пламени без добавок, до 1 см/сек для пламени с добавкой. Это связано со значительным изменением прозрачности пламени при увеличении концентрации ингибитора в горючей смеси. Процедуры определения фронта пламени в виде изолинии с максимальным градиентом скорости газа и соответственно его локальной кривизны основаны на рекомендациях из работ [10-14]. Впервые для DME эти процедуры были использованы в работе [15]. Также, показано, что полученные результаты зависимости скорости горения от добавки TMP хорошо согласуются с кинетическими расчетами и литературными данными [16].

Результаты зависимости от стехиометрического коэффициента и концентрации в горючей смеси TMP скорости распространения пламени (слева) и первой длины Маркштейна (справа) представлены на рис.2. Видно, что небольшая добавка ингибитора значительно влияет как на скорость горения, так и на длину Маркштейна. Таким образом, при ингибировании турбулентного пламени возможен тройной эффект: уменьшение

нормальной скорости распространения пламени, уменьшение локальной скорости горения и площади пламени в результате уменьшения количества и размера характерных топологий в виде «бугров» и «ям».

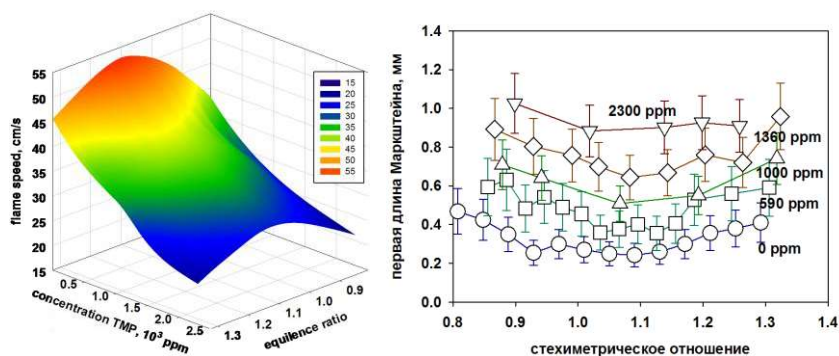


Рис.2 Результаты измерения скорости горения и длины Маркштейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darrius G., "Propagation d'un front de flamme," 1938. Unpublished work; presented at La Technique Moderne (Paris) and in 1945 at Congrès de Mécanique Appliquée (Paris).
2. Landau L., "On the Theory of Slow Combustion," Dynamics of Curved Fronts, Vol. XIX, No. 1, 1944, pp. 403–411. doi:10.1016/B978-0-08-092523-3.50044-7.
3. Markstein G., Nonsteady flame propagation, McMillan Publication, New York, 1964.
4. Matalon M., Matkowsky B.J., Flames as gasdynamics discontinuities, J Fluid Mech 124 (1982) 239–259 .
5. Patyal A., Matalon M., Nonlinear development of hydrodynamically-unstable flames in three-dimensional laminar flows, Combustion and Flame 195 (2018) 128–139
6. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Markovich D. M., Dulin V. M., Sharaborin D. K. Spatial and temporal resolution of the particle image velocimetry technique in flame speed measurements, Combustion Explosion and Shock Waves 50(5):510-517, DOI: 10.1134/S0010508214050025;
7. Bolshova T. A., Korobeinichev O. P., Toropetskii K. V., Shmakov A. G., Chernov A. A., Catalytic effect of submicron TiO₂ particles on the methane–air flames speed, Combustion Explosion and Shock Waves 52(2):155-166, DOI: 10.1134/S0010508216020040
8. <http://str.kinetics.nsc.ru/CMS/index.php?id=275>
9. Fristrom R.M., Definition of Burning Velocity and a Geometry Interpretation of the Effects of Flame Curvature, Physics of Fluids 8, № 2, (1965) 273-280
10. Choi C.W., Puri I.K., Contribution of Curvature to Flame-Stretch Effects on Premixed Flames, Combust. Flame, 126 (2001), pp. 1640-1654;
11. Cohé C, Chauveau C, Gökalp I, Kurtulus DF, CO₂ addition and pressure effects on laminar and turbulent lean premixed CH₄ air flames, Proceedings of the Combustion Institute 32(2):1803-1810, DOI: 10.1016/j.proci.2008.06.181;
12. Gao X., Zhang Y., Adusumilli S., Seitzman J., Sun W., Ombrello T., Carter C., "The effect of ozone addition on laminar flame speed," Combustion and Flame, vol. 162, no. 10, pp. 3914-3924, 2015,
13. Tamadonfar Parsa, Gulder Omer L. Experimental investigation of the inner structure of premixed turbulent methane/air flames in the thin reaction zones regime // Combustion and Flame 162 (2015) 115–128;
14. Giannakopoulos G. K., Gatzoulis A., Frouzakis C. E., Matalon M., Tomboulides A. G., Consistent definitions of "Flame Dis-placement Speed" and "Markstein Length" for premixed flame propagation, Combustion and Flame 162 (2015) 1249–1264
15. Knyazkov D., Alyanova N., Bolshova T., Chernov A., Shvartsberg V., Shmakov A., Inhibition of Dimethyl Ether Combustion by Trimethyl Phosphate, 37-th International Symposium on Combustion, Dublin, 29 Juli - 3 August 2018, Book of abstracts, ID:16657
16. Knyazkov, D. A., Bolshova, T. A., Shvartsberg, V. M., Gerasimov, I. E., Shmakov, A. G., & Korobeinichev, O. P. (2019). Effect of inhibitors on flammability limits of dimethyl ether/air mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, *37*(3), 4267-4275. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.109>