

УДК 621.43.019

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-28-69-73

**Влияние интенсивности турбулентности на ширину зоны
химических реакций и скорость распространения
метановодородного пламени**

А. П. Шайкин, И. Р. Галиев

*Тольяттинский государственный университет
Тольятти, Россия*

Аннотация

Показана перспективность использования метановодородного топлива в энергетических установках. Исследовано влияние интенсивности турбулентности на скорость распространения и ширину зоны химических реакций метановодородного пламени в камере сгорания переменного объема. В статье показано, что влияние интенсивности турбулентности на скорость распространения и ширину пламени зависит от коэффициента избытка топлива. При сжигании стехиометрических топливовоздушных смесей увеличение турбулентности приводит к более заметному росту скорости пламени, чем при сжигании бедных и богатых смесей. В свою очередь, экспериментально выявлено, что увеличение интенсивности турбулентности приводит к заметному изменению ширины пламени только при сжигании бедных и богатых топливовоздушных смесей. Обработка результатов зарубежных и отечественных ученых показала справедливость полученных нами закономерностей для камер сгораний разных конструкций, использующих разное углеводородное топливо. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и доводке энергоэффективных и малоэмиссионных камер сгораний.

Ключевые слова

пламя, скорость распространения пламени, ширина зоны химических реакций, интенсивность турбулентности, водород, hythane, камера сгорания

Источник финансирования

Статья публикуется при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы назначения стипендии Президента РФ для молодых ученых СП-3204.2018.1

Для цитирования

Шайкин А. П., Галиев И. Р. Влияние интенсивности турбулентности на ширину зоны химических реакций и скорость распространения метановодородного пламени // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 4. С. 69–73. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-69-73

**Influence Intensity Turbulence on the Width
of the Zone Chemical Reactions and Speed Distribution
of Methane-Hydrogen Flame**

A. P. Shaykin, I. R. Galiev

*Tolyatti State University
Tolyatti, Russian Federation*

Abstract

The prospects using methane-hydrogen fuel in power plants are shown. The effect of turbulence intensity on propagation velocity and width of the zone of chemical reactions methane-hydrogen flame in combustion chamber of variable volume is investigated. The article shows that effect of turbulence intensity on propagation velocity and flame width depends on fuel excess coefficient. During combustion of stoichiometric fuel-air mixtures, an increase in turbulence leads to a more noticeable increase in flame velocity than when burning poor and rich mixtures. It was experimentally

found that increase in intensity of turbulence leads to a noticeable change in width of the flame only when burning poor and rich fuel-air mixtures. Processing of the results of foreign and domestic scientists has shown validity of our laws for combustion chambers of different designs using different hydrocarbon fuels. The results of the work can be used in design and debugging of energy-efficient and low-emission combustion chambers.

Keywords

flame propagation velocity, width of chemical reaction zone, intensity of turbulence, hydrogen, hythane, combustion chamber, flame

Funding

The article is published with the support of the Ministry of science and higher education of the Russian Federation as part of the Russian President's scholarship program for young scientists SP-3204.2018.1

For citation

Shaykin A. P., Galiev I. R. Influence Intensity Turbulence on the Width of the Zone Chemical Reactions and Speed Distribution of Methane-Hydrogen Flame. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 4, p. 69–73. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-69-73

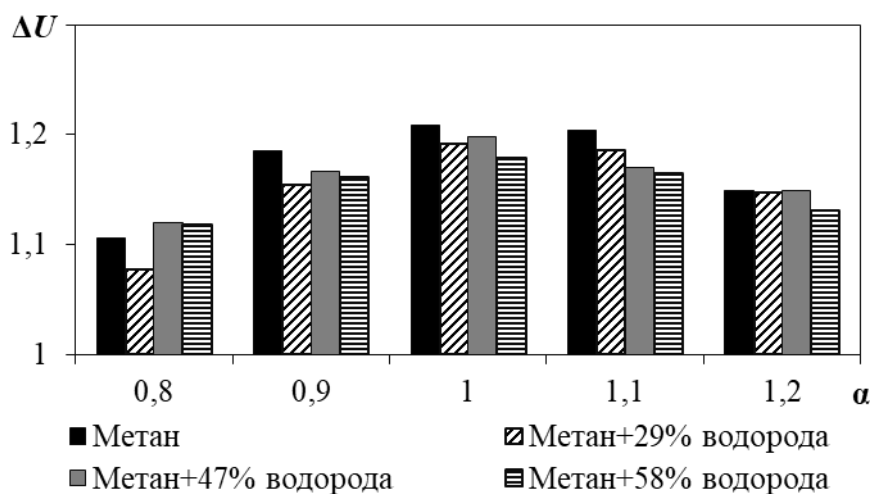
В последние два десятилетия ученые и инженеры ведущих стран мира (США, Англия, Россия, Китай) уделяют большое внимание новому топливу hythane – смеси метана с водородом [1]. В ПАО «Газпром» создана экспериментальная установка для получения в промышленных масштабах hythane с содержанием водорода до 48 % [2]. Интерес промышленности и науки к hythane обусловлен тем, что использование hythane способствует значительному снижению токсичности выхлопа энергоустановки и повышению ее тягово-динамических показателей [1; 3]. Для создания новых малоэмиссионных и энергоэффективных камер сгорания (КС), использующих hythane, необходимо глубокое изучение процесса сгорания комбинированного топлива. В настоящее время остается малоизученным влияние интенсивности турбулентности на скорость распространения и ширину зоны химических реакций метановодородного пламени в условиях КС переменного объема. Результаты исследования позволят сократить время и средства при создании новых энергетических установок, использующих hythane и соответствующих современным требованиям по мощности, экономичности и токсичности отработавших газов.

Цель работы – изучить влияние интенсивности турбулентности на скорость распространения и ширину зоны химических реакций метановодородного пламени в камере сгорания переменного объема.

Эксперименты проводились в КС переменного объема с искровым зажиганием [4]. В качестве топлива использовался hythane с содержанием водорода $r_H = 29, 47$ и 58 % (по объему). Изменение интенсивности турбулентности осуществлялось изменением частоты вращения коленчатого вала энергоустановки с 600 до 900 мин^{-1} . Скорость распространения и ширина пламени исследовались во второй (основной) фазе, в которой происходит сгорание основной массы горючей смеси вследствие развития турбулентного фронта пламени на больший объем КС.

В результате анализа экспериментальных данных выявлено, что увеличение интенсивности турбулентности в $1,5$ раза приводит к росту скорости пламени. Особенно ярко данная тенденция проявляется при сжигании топливовоздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха от $0,9$ до $1,1$, так как в данном случае горение в КС описывается моделью микроламинарного пламени, т. е. число Карловица меньше единицы, а число Дамкелера больше единицы. Турбулентные вихри не проникают в зону химических реакций пламени, а только меняют ее конфигурацию, поэтому увеличение интенсивности турбулентности приводит к увеличению площади поверхности фронта пламени и, как следствие, к росту скорости распространения пламени. На рисунке (см. далее) видно, что при сжигании бедных и богатых смесей увеличение скорости пламени за счет роста интенсивности турбулентности уменьшается. Это связано с тем, что при сжигании бедных смесей ($\alpha > 1,1$) ширина ламинарного пламени увеличивается, турбулентные вихри проникают в зону химических реакций пламени и влияют на кинетику химических реакций, т. е. числа Карловица и Дамкелера больше еди-

ницы. Турбулентность потока приводит к разрыву зоны химических реакций и снижению скорости распространения пламени.



Изменение скорости распространения пламени при увеличении интенсивности турбулентности в 1,5 раза
Change rate of flame propagation with an increase intensity of turbulence by 1.5 times

Отметим, что схожие результаты были получены при анализе данных голландских ученых [5], изучавших влияние частоты вращения коленчатого вала поршневой энергоустановки на скорость распространения пламени в КС переменного объема. А также в работе [6], в которой экспериментально показано влияние пульсационной скорости на скорость распространения пламени в разные моменты сгорания топлива в КС постоянного объема.

Исследование влияния интенсивности турбулентности на ширину зоны химических реакций пламени показало, что при коэффициентах избытка воздуха от 0,9 до 1,1 увеличение интенсивности турбулентности в 1,5 раза не приводит к заметному изменению ширины пламени. Так, изменение δ при $\alpha = 1$ составило всего 2 %. При $\alpha = 1,2$ рост интенсивности турбулентности привел к увеличению ширины пламени уже на 8 %, а при $\alpha = 0,8$ ширина пламени увеличилась на 7 %. Это объясняется тем, что при сжигании бедных и богатых смесей ширина ламинарного пламени увеличивается, турбулентные вихри проникают в зону химических реакций пламени и влияют на кинетику химических реакций, т. е. числа Карловица и Дамкелера больше единицы. Турбулентность потока приводит к разрыву и растяжению зоны химических реакций пламени, поэтому δ увеличивается. Отметим, что обработка экспериментальных данных, полученных на бензопоршневой энергоустановке [7], выявила схожее поведение ширины пламени при увеличении интенсивности турбулентности. В частности, при $\alpha = 1$ ширина пламени увеличилась на 4 %, а при $\alpha = 1,2$ прирост δ составил 9 %.

Заключение

1. Влияние интенсивности турбулентности на скорость распространения пламени зависит от коэффициента избытка топлива (при α от 0,9 до 1,1 увеличение турбулентности приводит к более заметному росту скорости пламени, чем при $\alpha > 1,1$ и $\alpha < 0,9$) и не зависит от концентрации водорода в топливе.

2. Исследование влияния интенсивности турбулентности на ширину зоны химических реакций пламени показало, что при α от 0,9 до 1,1 увеличение интенсивности турбулентности

в 1,5 раза не приводит к заметному изменению ширины пламени. При сжигании бедных и богатых топливовоздушных смесей интенсивность турбулентности способствует увеличению ширины зоны химических реакций.

3. Обработка результатов зарубежных и отечественных ученых показала справедливость полученных нами закономерностей для камер сгорания разных конструкций, использующих разное углеводородное топливо.

Список литературы

1. **Sandalcı T., Galata S., Karagöz Y.** Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 5, p. 3208–3220.
2. **Аксютин О. Е., Ишков А. Г., Романов К. В.** Вклад газовой отрасли в формирование энергетической модели на основе водорода // Вести газовой науки. 2017. С. 12–20.
3. **Tangoz S., Kahraman N., Akansu S.** The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fuelled by compressed natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, iss. 40, p-2. 257665780.
4. **Шайкин А. П., Ивашин П. В., Галиев И. Р., Дерячев А. Д.** Характеристики распространения пламени и их влияние на образование несгоревших углеводородов и оксида азота в отработавших газах при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием. Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2016. 259 с.
5. **Doosje E.** Limits of mixture dilution in gas engines. Doctoral thesis. Eindhoven, 2010, 370 p.
6. **Ting D., Checkel M., Johansson B.** The Importance of High-Frequency, Small-Eddy Turbulence in Spark Ignited, Premixed Engine Combustion. *SAE*, 1995, no. 952409, p. 1–15.
7. **Дерячев А. Д.** Эмпирическая модель оценки концентрации оксидов азота при добавке водорода в ТВС двигателей с искровым зажиганием: Дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2015. 150 с.

References

1. **Sandalcı T., Galata S., Karagöz Y.** Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 5, p. 3208–3220.
2. **Aksyutin O. E., Ishkov A. G., Romanov K. V.** Vakuumnaya gazovaya otrasl' na osnove vodoroda. *Vesti gazovoy nauki*, 2017, p. 12–20. (in Russ.)
3. **Tangoz S., Kahraman N., Akansu S.** The effect of hydrogen on the performance and emissions of an SI engine having a high compression ratio fuelled by compressed natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, iss. 40, p-2. 257665780.
4. **Shaykin A. P., Ivashin P. V., Galiyev I. R., Deryachev A. D.** Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyaniye na obrazovaniye nescorovshikh uglevodorodov i oksida azota v rabochikh gazakh pri dobavlenii vodoroda v toplivno-vozdushnuyu smes' energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiyem. Samara, 2016, 259 p. (in Russ.)
5. **Doosje E.** Limits of mixture dilution in gas engines. Doctoral thesis. Eindhoven, 2010, 370 p.
6. **Ting D., Checkel M., Johansson B.** The Importance of High-Frequency, Small-Eddy Turbulence in Spark Ignited, Premixed Engine Combustion. *SAE*, 1995, no. 952409, p. 1–15.
7. **Deryachev A. D.** Empiricheskaya model' otsenki kontsentratsii oksidov azota pri dobavke vodoroda v TVS dvigateley s iskrovym zazhiganiyem. Dis. kand. tekhn. nauk. Toliyatti, 2015. 150 с. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию
Received
27.10.2019

Сведения об авторах / Information about the Authors

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления», Тольяттинский государственный университет (Тольятти, Россия)

Aleksandr P. Shaykin, Doctor of Science, Professor, Professor of the Department of Energy Machines and Control Systems, Tolyatti State University (Tolyatti, Russian Federation)

a_shajkin@mail.ru

Галиев Ильдар Ринатович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей», Тольяттинский государственный университет (Тольятти, Россия)

Ildar R. Galiev, candidate of science, Associate Professor of the Department of Vehicle Design and Operation, Tolyatti State University (Tolyatti, Russian Federation)

sbs777@yandex.ru