

УДК 536.464

## **Исследование пламени в модели мезомасштабной камеры сгорания\***

**А.В. НАЗАРОВ, С.И. ШТОРК**

*Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

Проведено экспериментальное исследование процесса горения в цилиндрической мезомасштабной камере сгорания при сильной закрутке предварительно перемешанной пропан-воздушной смеси. Диаметр трубок, из которых изготавливался цилиндрический рабочий участок, варьировался от 15 до 27 мм. Были проведены предварительные исследования, в ходе которых были измерены параметры, характеризующие работу горелочного устройства: профиль температуры вдоль цилиндрической трубки камеры, газовый состав продуктов реакции горения. Полученные результаты показывают, что в трубке наименьшего исследованного диаметра устойчивое горение без срыва или выхода пламени за пределы трубки возможно только в условиях, близких к стехиометрическим. Для трубок с большими диаметрами область устойчивости пламени расширяется в сторону обедненных смесей. В зависимости от материала трубок наблюдаются заметные различия в распределениях температуры вдоль стенок. Существенное влияние на исследованные параметры оказывает также степень обеднения топливно-воздушной смеси. При увеличении диаметра камеры фронт пламени опускается вниз в связи с большой областью дополнительного разогрева, но распределение температуры вдоль трубки становится неравномерным с явно выраженными пиками. Содержание вредных выбросов при горении обедненных смесей минимально, при этом зона реакции находится на удаленном расстоянии от основания трубки. Проведение дальнейших экспериментов будет направлено на получение детальных характеристик реагирующего течения в каналах малого размера. Конечной задачей исследований является нахождение устойчивых режимов горения в малогабаритной камере сгорания.

**Ключевые слова:** закрутка потока, мезомасштабная камера сгорания, самоподдерживающийся режим горения, зона рециркуляции, газовый анализ продуктов сгорания, TRV, пропан-воздушная смесь, стехиометрическая смесь.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие малогабаритных электронных устройств требует разработки особых источников питания высокой энергоемкости. Камеры сгорания микро и мезо масштабов являются альтернативными источниками питания для многих энергопотребляющих систем [1, 2]. Источники питания на основе термофотопреобразователей (TRV) являются экономически выгодными наряду с другими системами преобразования энергии, благодаря непосредственному преобразованию энергии излучения в электрическую [3, 4]. Вследствие высокой гравиметрической плотности энергии сжиженных углеводородов (~50 МДж/кг), система TRV способна конкурировать с современными литиевыми аккумуляторами (~0.6 МДж/кг).

Существующие на настоящее время разработки в данной области не позволяют вывести реально работающие малогабаритные источники питания на производственный уровень. Причиной этого является наличие серьезных принципиальных трудностей, возникающих при переходе к малоразмерным камерам сгорания [1]. Основная проблема сжигания топлива в камерах малого масштаба – это неустойчивость процесса горения [5]. Закрутка топливной смеси благоприятно сказывается на структуре течения, что позволяет повысить пределы устойчивости устройства. В зависимости от интенсивности она изменяет размер, форму, устойчивость факела, и интенсивность процесса горения [6].

---

\* Статья получена 09 апреля 2013 г.  
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-31460), грантов Правительства России (грант №11.G34.31.0046) и Минобрнауки РФ.

Основная цель работы – определение пределов устойчивости горения в цилиндрической камере с тангенциальным подводом топливной смеси, а также изучение влияния различных параметров на распространение пламени внутри камеры [7].

### 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для работы была изготовлена модель цилиндрической камеры с двумя тангенциальными входами, которые создают закрученный поток. Степень закрутки [6] равна  $S = 1.76, 3.45$  и  $5.7$  для трубок  $\text{Ø}15$  мм,  $\text{Ø}21$  мм и  $\text{Ø}27$  мм соответственно. Схема камеры представлена на рис. 1.

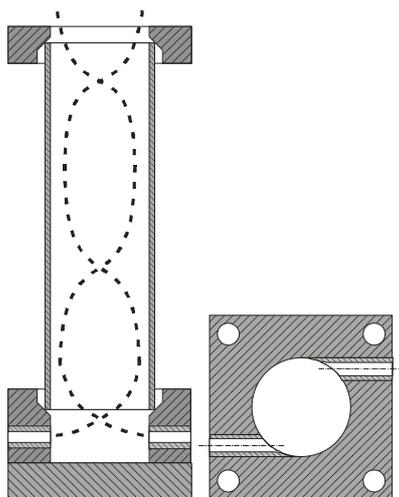


Рис. 1. Внутреннее устройство камеры сгорания.

Характерные режимы горения были разделены на три основных группы:

- 1) неустойчивое горение в трубке с последующим срывом пламени;
- 2) устойчивое горение в трубке без или со слабо выраженным вторичным пламенем над трубкой;
- 3) устойчивое горение в трубке с появлением вторичного пламени высотой  $10 \dots 50$  мм.

Для режимов устойчивого горения исследованы профили температур на стенках трубок, газовый анализ продуктов реакции горения.

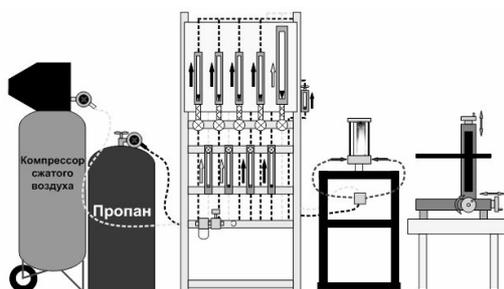


Рис. 2. Принципиальная схема установки

Принципиальная схема установки представлена на рис. 2. На выходе из камеры устанавливался зонд газоанализатора для получения концентрации газового состава продуктов реакции, таких как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ . С помощью координатного устройства и инфракрасного пирометра определялось изменение температуры внешней стенки камеры по высоте камеры.

Также в ходе работы использовался спектрограф для получения спектральных кривых излучения основания пламени через кварцевую трубку.

Интенсивность закрутки потока характеризуется безразмерным параметром  $S$ , который вычисляется на основе геометрии завихрителя  $S = \frac{\pi D_0 D_e}{4 A_\tau}$  [6], где  $D_0$  – диаметр камеры,  $D_e$  – диаметр сопла,  $A_\tau$  – площадь входных отверстий.

Аэродинамические характеристики исследуемых потоков характеризуются числом Рейнольдса  $Re$ :  $Re = \frac{UL}{\nu}$ , где  $U$  – характерная скорость,  $L$  – характерный размер,  $\nu$  – кинематическая вязкость. В данной работе в качестве скорости  $U$  и масштаба  $L$  использовались среднерасходная скорость во входных соплах и их диаметр.

Химический состав смеси характеризовался коэффициентом стехиометрии  $\phi$ , который определяется как отношение объемного расхода пропана к объемному расходу воздуха (в данном эксперименте использовался пропан и воздух):  $\phi = 24,1213 \frac{Q_{fuel}}{Q_{air}}$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 3–5 представлены пределы устойчивости для стальных трубок. Результаты показывают, что в трубке наименьшего диаметра устойчивое горение без срыва или выхода пламени возможно только вблизи стехиометрической смеси. Для трубок с большими диаметрами диапазон устойчивости расширяется в область обедненных смесей. Можно заметить, что область с устойчивым горением без или со слабым образованием вторичного пламени сужается при увеличении скорости подачи топливно-воздушной смеси, а область с образованием вторичного пламени увеличивается. Связано это с тем, что компоненты не успевают полностью прореагировать вследствие малого времени пребывания внутри камеры сгорания. В итоге на выходе из камеры сгорания происходит дожигание компонентов.



Рис. 3. Предел устойчивости пламени для стальной трубки с внутренним диаметром 15 мм

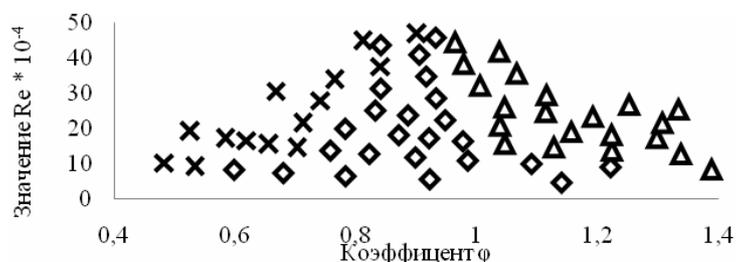


Рис. 4. Предел устойчивости пламени для стальной трубки с внутренним диаметром 21 мм

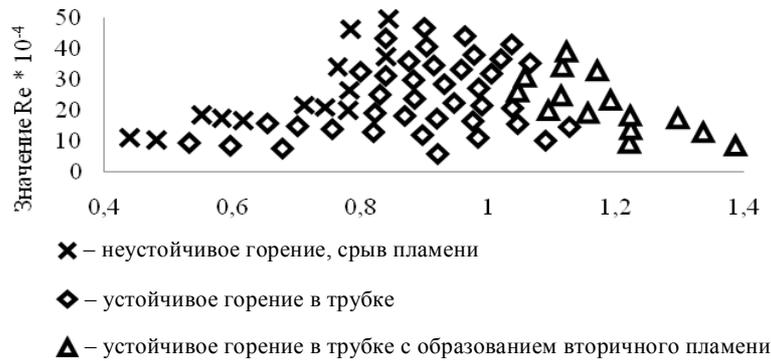


Рис. 5. Предел устойчивости пламени для стальной трубки с внутренним диаметром 27 мм

В зависимости от материала камеры наблюдаются заметные различия в температурах. Распределение температуры вдоль стальной трубки, обладающей большей теплопроводностью, более плавное. Заметим, что равномерное распределение температуры вдоль стенок камеры позволяет увеличить срок службы оборудования.



Рис. 6. Профиль температуры поверхности трубки с внутренним диаметром 15 мм в зависимости от материала стенки при значении  $\varphi = 0.95$  и расходом топлива  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

Существенное влияние на исследованные параметры оказывает также степень обеднения топливно-воздушной смеси. На рис. 7 представлены профили температуры для стальной трубки с внутренним диаметром 15 мм. Из графиков видно, что при увеличении коэффициента стехиометрии, фронт пламени понижается. Связанно это с тем, что при обеднении смеси, энергия, выделяемая в ходе реакции, меньше энергии активации реакции горения, и соответственно продукты реакции проходят дополнительный путь разогрева для воспламенения.

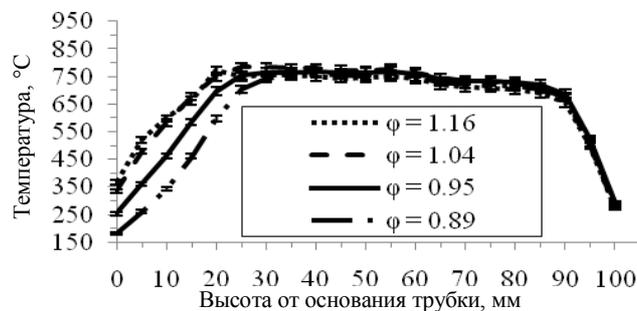


Рис. 7. Профиль температуры поверхности стальной трубки с внутренним диаметром 15 мм в зависимости от коэффициента стехиометрии

На рис. 8 расход топлива составлял  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с, на рис. 9 расход топлива составлял  $3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с. Из графиков видно, что при увеличении диаметра фронт пламени понижается в связи с большой областью дополнительного разогрева, но распределение температуры вдоль трубки становится неравномерным с явно выраженными пиками температуры. Данная неоднородность может ухудшать состояние материала стенок камеры сгорания и, соответственно, снижать срок службы оборудования. Зона воспламенения сдвигается вверх, при уменьшении диаметра трубок. При увеличении расхода топливно-воздушной смеси основная зона горения приподнимается в связи с недостаточным разогревом смеси.

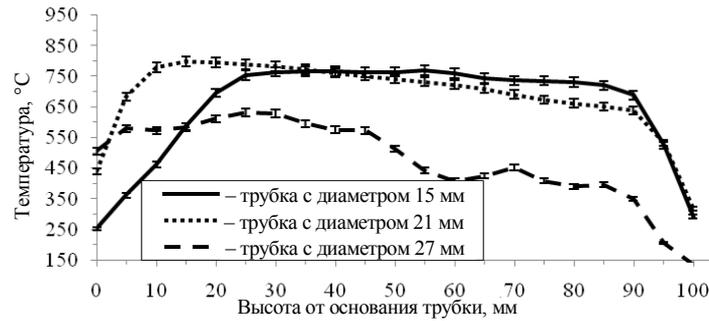


Рис. 8. Профиль температуры поверхности стальной трубки в зависимости от внутреннего диаметра при значении  $\phi = 0.95$  и расходом топлива  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с

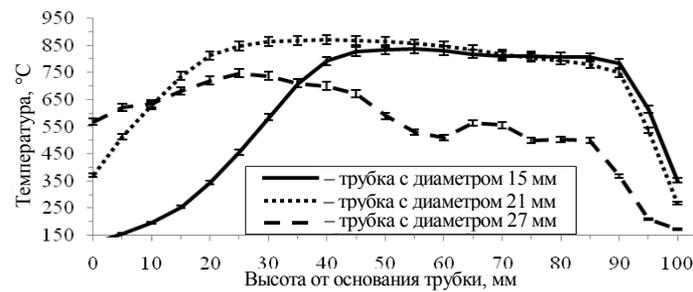


Рис. 9. Профиль температуры поверхности стальной трубки в зависимости от внутреннего диаметра при значении  $\phi \approx 1.08$  и расходом топлива  $3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с

Содержание CO<sub>2</sub> равномерно возрастает с увеличением  $\phi$ . Данная закономерность типична только до стехиометрической смеси, но дальше, в зоне богатых смесей, содержание CO<sub>2</sub> должно понижаться.

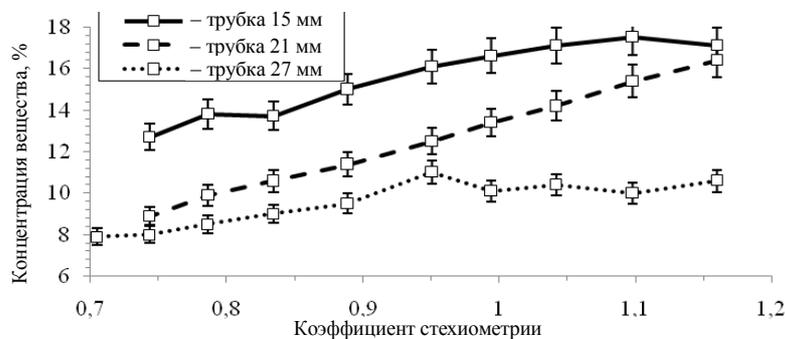


Рис. 10. Содержание CO<sub>2</sub> для трубок различного внутреннего диаметра

Содержание  $O_2$  равномерно понижается. В теории содержание  $O_2$  должно быть близким к нулю после  $\varphi = 1$ , в эксперименте же наблюдаются ненулевые концентрации  $O_2$ , что может быть связано с подсосом окружающего воздуха.

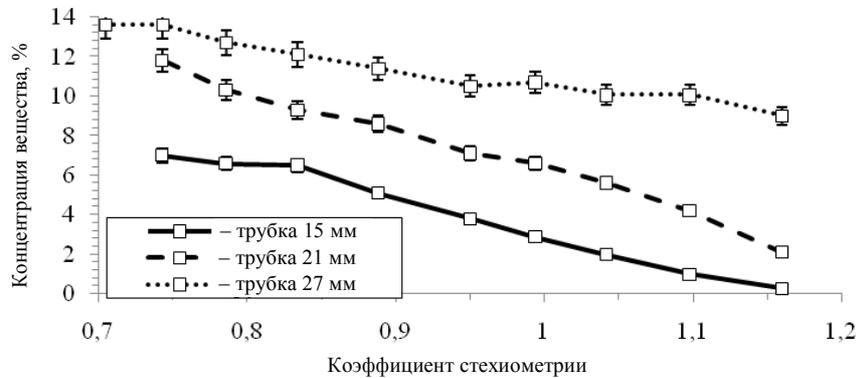


Рис. 11. Содержание  $O_2$  для трубок различного внутреннего диаметра.

Наблюдаемый сдвинутый в зону богатых смесей пик  $NO$  также может быть связан с подсосом окружающего воздуха. Необходимо обратить внимание на то, что уровень выбросов  $NO$  достаточно резко снижается при обеднении топливно-воздушной смеси.

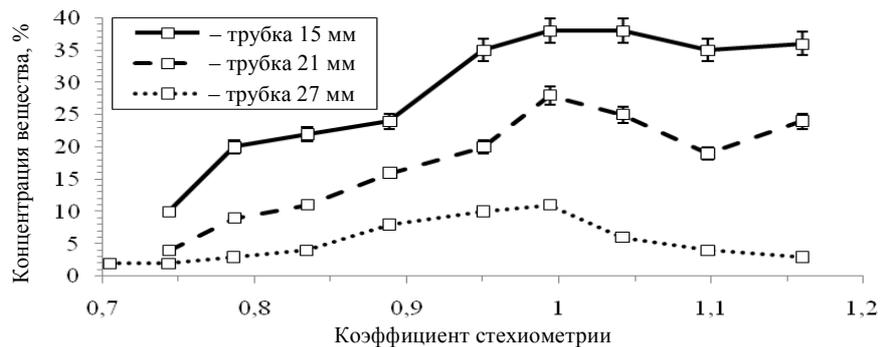


Рис. 12. Содержание  $NO$  для трубок различного внутреннего диаметра.

Содержание  $CO$  имеет нормальное распределение в зоне обеднённых пламен, а резкое повышение содержания после  $\varphi = 1$  объясняется недогоранием топлива в камере. Визуально можно видеть, что имеет место последующее дожигание  $CO$  в зоне рециркуляции окружающего воздуха за выходом из камеры сгорания.

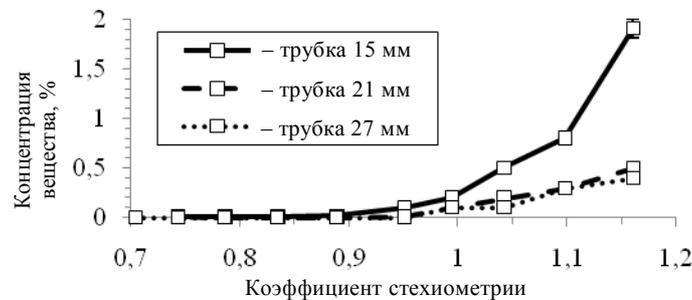


Рис. 13. Содержание  $CO$  для трубок различного внутреннего диаметра

### ВЫВОДЫ

В ходе проведенных опытов было выяснено, что при уменьшении размеров камеры возникают сложности с поддержанием устойчивого горения топливно-воздушной смеси. Содержание вредных выбросов при горении обедненных смесей минимально, однако, зона реакции находится на удаленном расстоянии от основания трубки. Для больших трубок была обнаружена неравномерность распределения температуры стенки камеры, означающей высокие температурные градиенты вдоль длины, вследствие чего может возрасти износ материала стенок камеры. В опытах было показано, что существует некий оптимум между трубкой малого и большого диаметров. Для уменьшения зоны рециркуляции целесообразно устанавливать на выходе диафрагму, которая будет также способствовать повышению температуры внутри камеры сгорания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Dunn-Rankin D.** Personal power systems / D. Dunn-Rankin, E.M. Leal, D.C. Walther // Prog. Energy Combust. Sc. – 2005. – Vol. 31. – P. 422–465.
- [2] **Sitzki L.** Combustion in Microscale Heat-Recirculating Burners / L. Sitzki, K. Borer, E. Schuster, P.D. Ronney, S. Wussow // The Third Asia-Pacific Conference on Combustion, Seoul, Korea, June 24–27, 2001. – Vol. 6. – P. 11–14.
- [3] **Yang W.** Research on micro-thermophotovoltaic power generators with different emitting materials / W. Yang, S. Chou, C. Shu, H. Xue, Z. Li // J. Micromech. Microeng. – 2005. – Vol. 15. – P. S239–S242.
- [4] **Струтинская Л.Т.** Термоэлектрические микрогенераторы. Современное состояние и перспективы использования / Л.Т. Струтинская // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 4. – С. 5–13.
- [5] **Choi B.** Experimental and numerical studies of mixing and flame stability in a micro-cyclone combustor / B. Choi, Y. Han, M. Kim, C. Hwang, C.B. Oh // Chemical Engineering Science. – 2009. – Vol. 64. – P. 5276–5286.
- [6] **Гупта А.** Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
- [7] **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

### REFERENCES

- [1] Dunn-Rankin D., Leal E.M., Walther D.C. Personal power systems. Prog. Energy Combust. Sc., 2005, vol. 31, pp. 422–465.
- [2] Sitzki L., Borer K., Schuster E., Ronney P.D., Wussow S. Combustion in Microscale Heat-Recirculating Burners. The Third Asia-Pacific Conference on Combustion. Seoul, Korea, June 24–27, 2001, vol. 6, pp. 11–14.
- [3] Yang W., Chou S., Shu C., Xue H., and Li Z. Research on micro-thermophotovoltaic power generators with different emitting materials. J. Micromech. Microeng, 2005, vol. 15, pp. S239–S242.
- [4] Strutinskaya L.T. Thermoelectric microgenerators. State of the art and perspectives of application. Technology and design in electronic apparatuses, 2008, № 4, pp. 5–13. (in Russian)
- [5] Choi B., Han Y., Kim M., Hwang C., Oh C.B. Experimental and numerical studies of mixing and flame stability in a micro-cyclone combustor. Chemical Engineering Science, 2009, vol. 64, pp. 5276–5286.
- [6] Gupta A., Lilley D.G., Syred N. Swirl flows. M.: Mir, 1987, 588 p. (in Russian)
- [7] Vargaftik N.B. Handbook on thermophysical properties of gases and liquids. M.: Nauka, 1972, 721 p. (in Russian)

*Назаров Айдар Вилданович*, аспирант Института теплофизики СО РАН. Основное направление научных исследований – тепловая энергетика. Имеет 2 публикации. E-mail: aydar15@gmail.com

*Шторк Сергей Иванович*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией 7.1 «Лаборатория экологических проблем теплоэнергетики» Института теплофизики СО РАН, старший научный сотрудник НИЧ НГУ. Основные направления научных исследований – энергетика, гидродинамика, теплофизика. Имеет более 100 публикаций. E-mail: shtork@itp.nsc.ru

**A.V. Nazarov, S.I. Shtork**

*Investigation of flame in a model of mesoscale combustion chamber*

An experimental study of combustion in a cylindrical meso-scale combustor with a strong swirl of pre-mixed propane-air mixture was made. The tube diameter which were used for fabrication of cylindrical test sections has been varied in a range between 15 and 27 mm. A preliminary study has been performed including measurements of some pa-

rameters which characterize performance of the burner device: temperature distribution along the cylindrical tube wall, composition of the burner exhaust gases. Obtained results show that for the tube with smallest diameter stable inner combustion without flame withdrawal outside the tube or flame blowout is possible only at conditions near the stoichiometry mixture. For tubes with larger diameters the flame stability range expands towards lean conditions. Depending on the tube material noticeable differences in temperature distributions along the walls were observed. Degree of the mixture dilution plays significant role on measured parameters as well. At increasing the tube diameter the flamer front goes down because of larger area of additional heating, but the temperature distribution along the tube becomes non-uniform with pronounced peaks. Level of detrimental gas emission at combustion of lean mixture is minimal, although the reaction zone is located away from the base of the tube. Further experiments will be directed on acquiring detailed characteristics of the reacting flow in narrow channels. The ultimate goal is to determine stable combustion regimes in small size combustion chambers.

**Key words:** swirling flow, mesoscale combustion chamber, self-sustaining combustion mode, recirculation zone, gas analysis of combustion products, TPV, propane-air mixture, stoichiometric mixture.