

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 - 28 июня 2013 г.*

УДК 536.464

А.В. Назаров<sup>1</sup>, С.И. Шторк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Россия,  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова., 2, E-mail: aydar15@gmail.com

<sup>2</sup> ИТ СО РАН, Новосибирск, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1,  
E-mail: shtork@itp.nsc.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАМЕНИ В МОДЕЛИ МЕЗОМАСШТАБНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

Проведено экспериментальное исследование процесса горения в цилиндрической мезомасштабной камере сгорания при сильной закрутке предварительно перемешанной пропан-воздушной смеси. Измерены основные параметры пламени на выходе: профиль температуры вдоль цилиндрической трубки камеры, газовый состав продуктов реакции горения, спектр излучения пламени у основания камеры. Конечной задачей исследований является нахождение устойчивых режимов горения в малогабаритной камере сгорания.

**ЗАКРУТКА ПОТОКА, КАМЕРА СГОРАНИЯ, САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИЙ РЕЖИМ, РЕЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ЗОНА, ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ, ЛДА ИЗМЕРЕНИЯ.**

### **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].

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

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для работы была изготовлена модель цилиндрической камеры с двумя тангенциальными входами, создающими закрученный поток. Степень закрутки [6] равна  $S = 3.45$  для трубки  $\varnothing 21$  мм. Схема камеры представлена на рис. 1.

Характерные режимы 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 10-50 мм

Для режимов устойчивого горения исследованы профили температур на стенках трубок, газовый анализ продуктов реакции горения, а также характерный спектр излучения через кварцевую трубку.

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 основания пламени через кварцевую трубку. Для измерения распределения скорости в рабочем участке использовался лазерный Доплеровский измеритель скорости (ЛДИС).

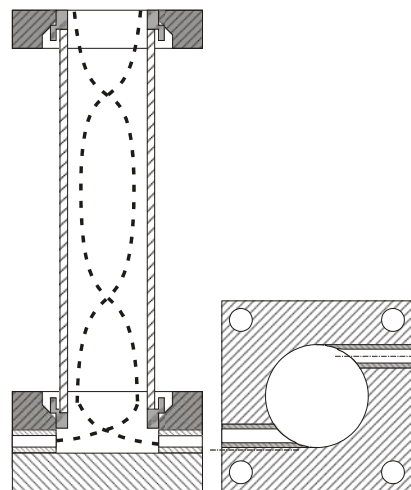


Рис. 1. Схема камеры

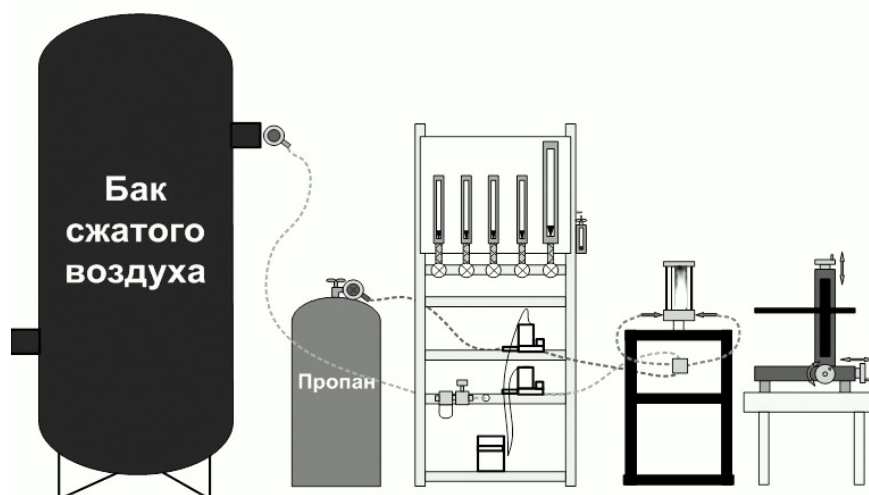


Рис. 2. Схема установки

Интенсивность закрутки характеризуется безразмерным параметром  $S$ , который вычисляется на основе геометрии завихрителя [6]:

$$S = \frac{\pi D_0 D_e}{4A_\tau},$$

где  $D_0$  – диаметр камеры,  $D_e$  – диаметр сопла,  $A_\tau$  – площадь входных отверстий.

Аэродинамические характеристики исследуемого течения 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  $\varphi$ , пропорциональным отношению объемного расхода пропана к объемному расходу воздуха. В данном эксперименте использовался пропан и воздух.

$$\varphi = 24,1213 \frac{Q_{fuel}}{Q_{air}}.$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены пределы устойчивости для стальной трубки. Результаты показывают, что в трубке устойчивое горение без срыва или выхода пламени возможно только вблизи стехиометрических условий. 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. Связанно 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.

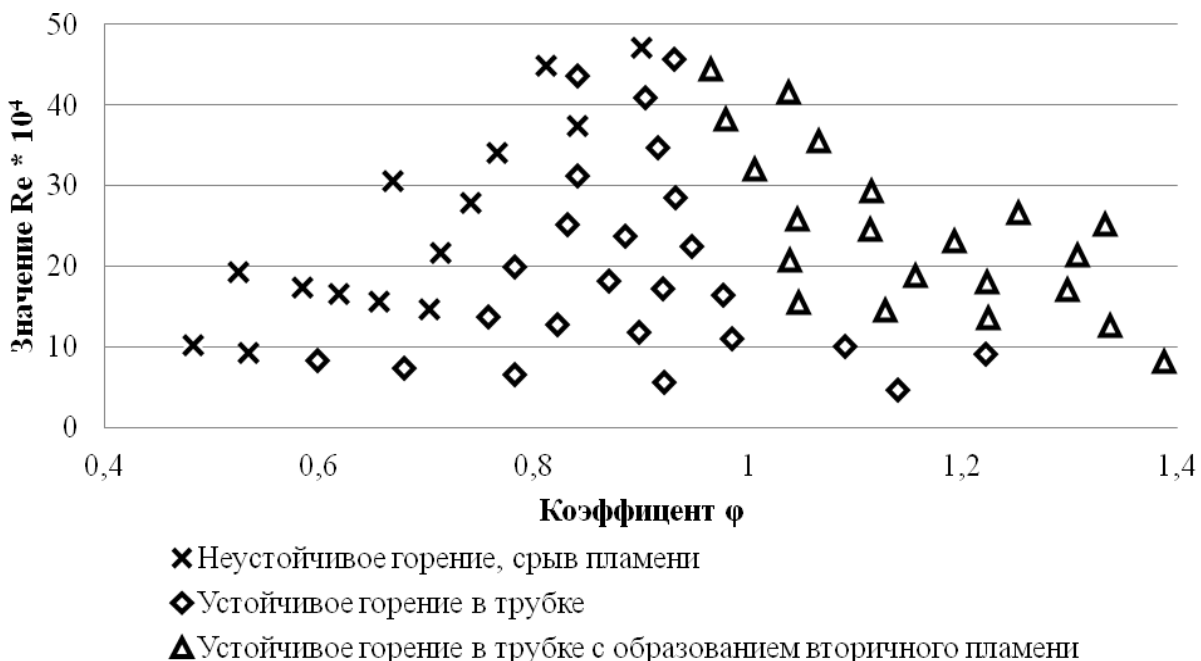


Рис. 3. Пределы устойчивости пламени для трубки с внутренним диаметром 21 мм

Далее была исследована эволюция температуры стенки, которая отражает процессы горения топлива внутри камеры сгорания. Профили температур на внешней поверхности камеры сгорания представлены на рис. 4, 5. В зависимости от материала камеры наблюдаются небольшие различия в температурах (рис. 4). Распределение температуры вдоль стальной трубки, обладающей большей теплопроводностью, более плавное. Заметим, что равномерное распределение температуры вдоль стенок камеры позволяет увеличить срок службы оборудования.



Рис. 4. Профиль температуры стенки в зависимости от материала камеры

Существенную роль в процессе горения играет степень обеднения. На рис. 5 представлены профили температур для стальной трубки с внутренним диаметром 21 мм. Из графиков видно, что при увеличении коэффициента  $\phi$ , фронт пламени поднимается. 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.

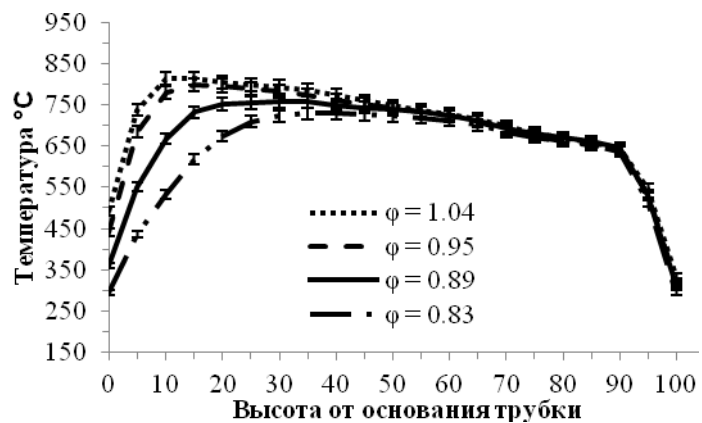


Рис. 5. Профиль температуры на стенке в зависимости от степени обеднения.

На рис. 6 представлены графики концентраций продуктов реакции на выходе из камеры для стальной трубки в зависимости от состава смеси. Видно, что содержание  $\text{CO}_2$  равномерно возрастает с увеличением  $\phi$ . Данная закономерность типична только до стехиометрической смеси, но дальше, в зоне богатых смесей, содержание  $\text{CO}_2$  должно понижаться.

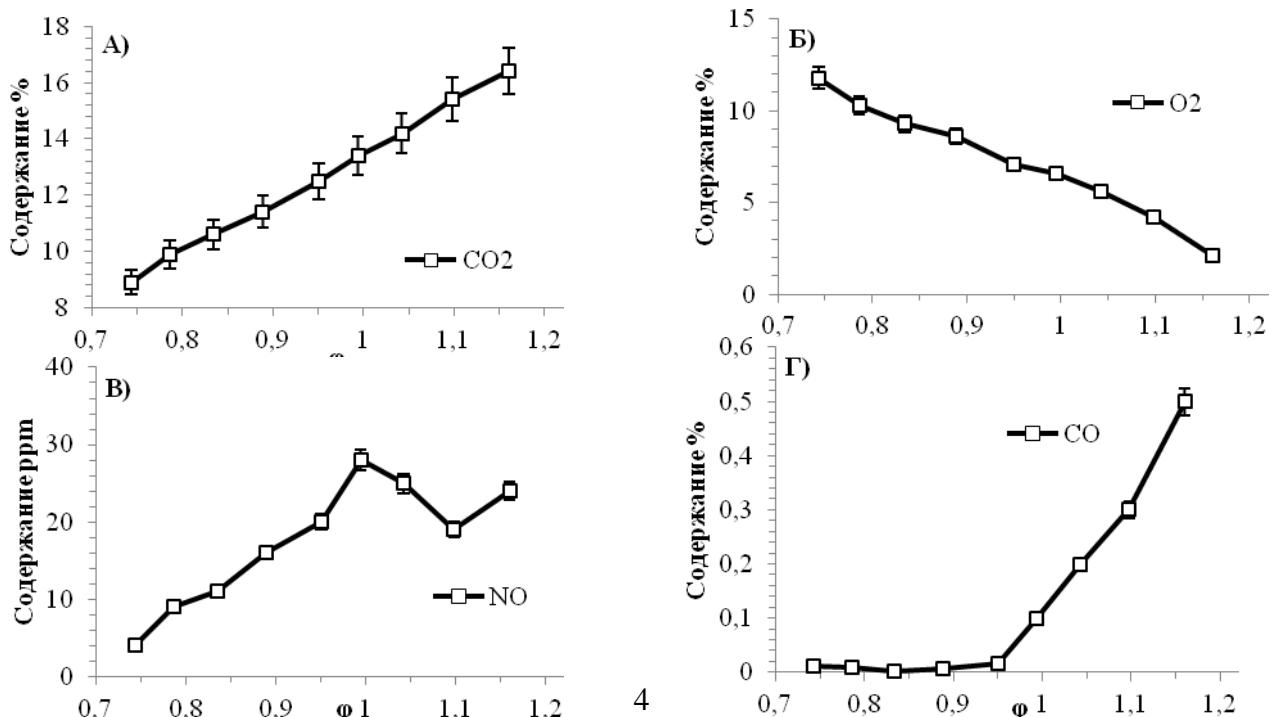


Рис. 6. Содержание основных компонентов сгорания на выходе из камеры. а – содержание  $\text{CO}_2$ , б – содержание  $\text{O}_2$ , в – содержание  $\text{NO}$ , г – содержание  $\text{CO}$

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

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.

Содержание  $CO$  имеет нормальное распределение в зоне обеднённых пламен, а резкое повышение содержания после  $\varphi = 1$  объясняется недогоранием топлива в камере и последующим дожиганием на выходе в зоне рециркуляции окружающего воздуха.

На рисунке 7 представлен характерный спектр пламени через кварцевую трубку. График отражает изменение спектра на фиксированной высоте около основания трубки при изменении коэффициента  $\varphi$ .

При  $\varphi = 0,76$  пламя приобретает своеобразный красный цвет, что свидетельствует о повышенной температуре. При  $\varphi = 0,72$  фронт пламени поднимается, и мы наблюдаем голубое пламя с низкой температурой.

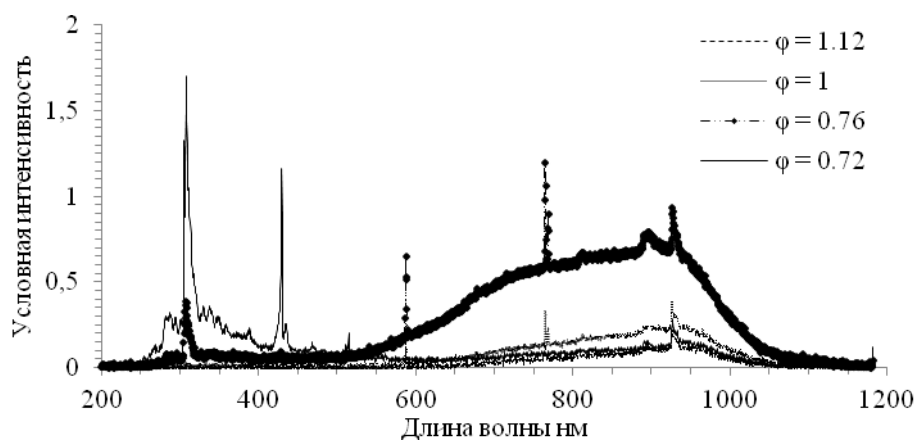


Рис. 7. Характерный спектр излучения пламени у основания

В ходе дальнейшей работы с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии были получены распределения скорости потока в трех горизонтальных сечениях камеры. Для измерений была изготовлена камера с оптическим доступом внутрь камеры. На рис. 8 представлены скорости для изотермического потока без пламени. Как можно видеть на правом графике, в центре формируется область возвратного течения.

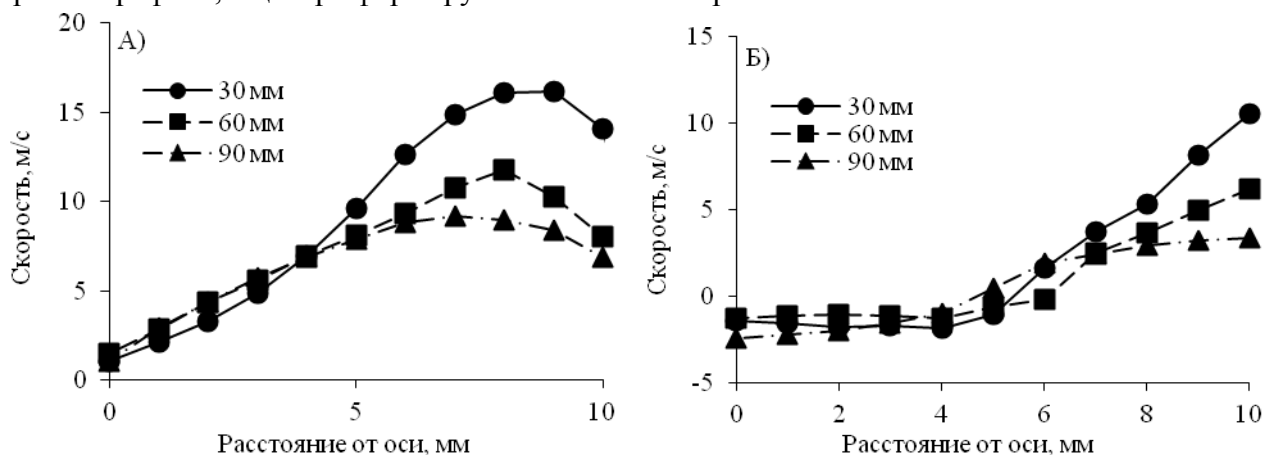


Рис. 8. Профиль скорости в сечении в зависимости от высоты над дном. Без горения.  
а – тангенциальная компонента. б – осевая компонента

На рис. 9 представлены среднеквадратичные отклонения скорости потока. Вблизи сдвигового слоя, разделяющего прямой и обратный потоки, наблюдается интенсивные пульсации осевой скорости.

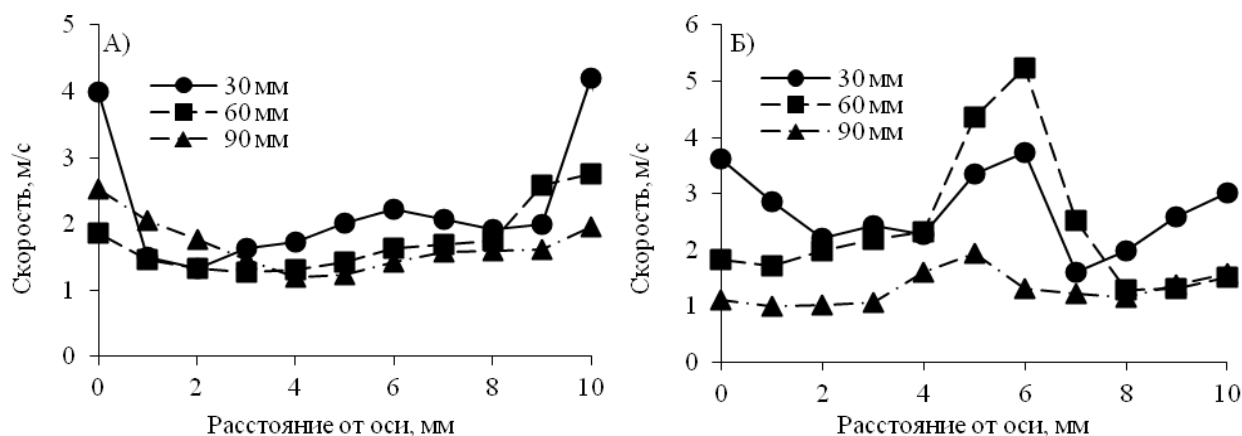


Рис. 9 Пульсации скорости в сечении в зависимости от высоты над дном. Без горения.  
а – тангенциальная компонента, б – осевая компонента.

На рис. 10 представлены скорости для потока с горением. В отличие от рис. 8, зона рециркуляции начинается выше.

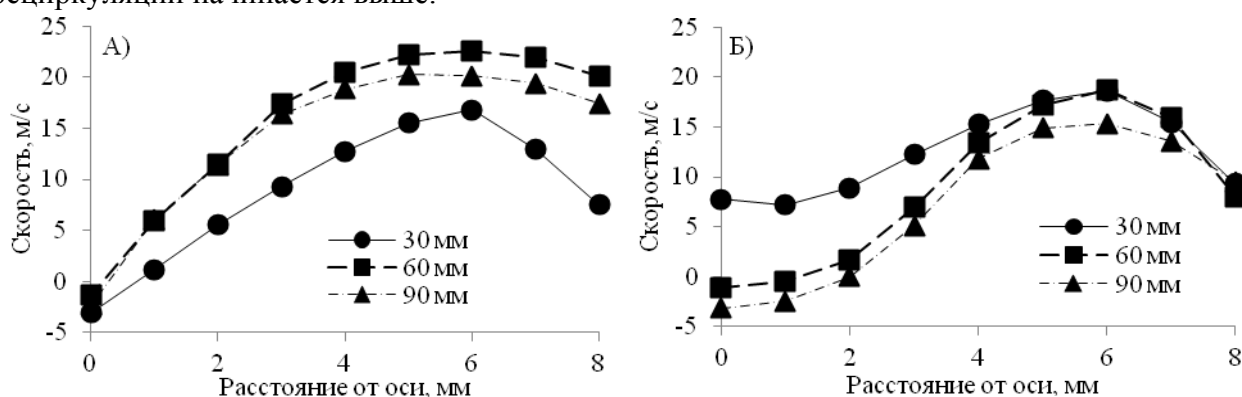


Рис. 10. Профиль скорости в сечении в зависимости от высоты над дном. С горением.  
а – тангенциальная компонента, б – осевая компонента.

На рис. 11 представлены среднеквадратичные отклонения скорости для потока с горением. Как видно из графиков, пульсации скорости вблизи стенок на дне максимальны. Поток, выходя из входных отверстий, прижимается к стенкам камеры, а затем разогревается. Такое резкое расширение заставляет поток устремляться от периферии к центру, создавая большой разброс скоростей по осевой и тангенциальной компонентам. Так же, как и на рис. 9, наблюдаются интенсивные пульсации осевой скорости на границе обратного течения.

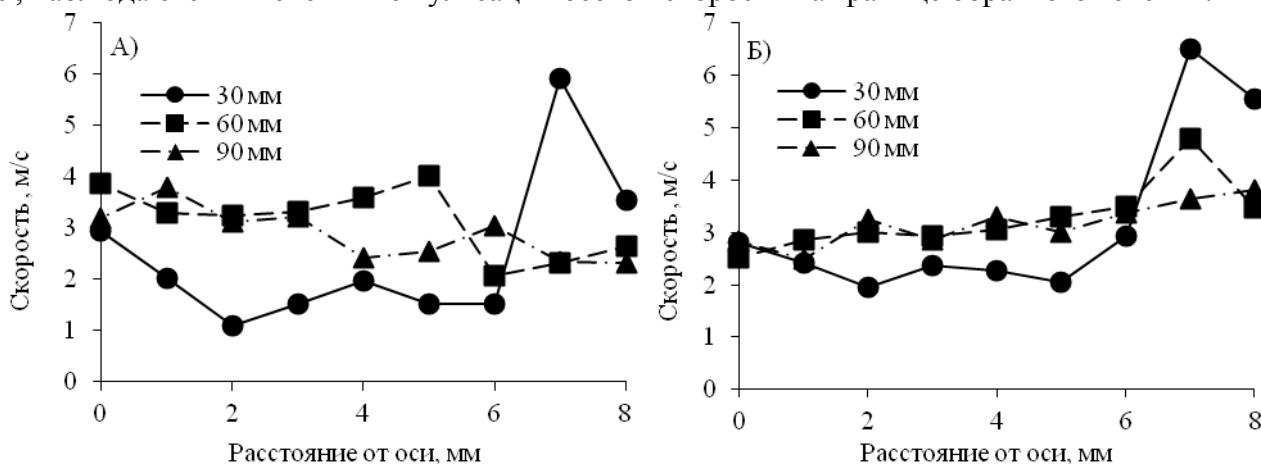


Рис. 11. Пульсации скорости в сечении в зависимости от высоты над дном. С горением.  
а – тангенциальная компонента, б – осевая компонента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных опытов было выяснено, что при уменьшении размеров камеры, возникают сложности с поддержанием устойчивого горения в трубке. Содержание вредных выбросов при горении обедненных смесей минимально, однако, как уже упоминалось, зона реакции находится на удаленном расстоянии от основания трубки. Вследствие этой неравномерности температуры может возрастать износ материала стенок камеры, поскольку в данном случае стенки камеры имеют высокий градиент температур вдоль длины. Измерения распределений скоростей с помощью ЛДИС показали формирование рециркуляционной зоны вблизи выхода из камеры. Для уменьшения зоны рециркуляции целесообразно устанавливать на выход диафрагму. Дальнейшее исследование будут направлены на модификацию геометрии устройства и получение детальной картины течения внутри камеры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dunn-Rankin D., Leal E.M., Walther D.C.** Personal power systems // Prog. Energy Combust. Sc. – 2005. - Vol. 31. - P. 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, June 24-27, 2001, Seoul, Korea.
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. – P. S239–S242.
4. **Струтинская Л.Т.** Термоэлектрические микрогенераторы. Современное состояние и перспективы использования // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. - №4. - С. 5-13.
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. **Гупта А., Лилли Д., Сайред Н.** Закрученные потоки, перевод Мир, Москва 1987.
7. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, Издательство: «НАУКА» Год: 1972.

A.V. Nazarov<sup>1</sup>, S.I. Shtork<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk, 2 Pirogova Street,, E-mail: aydar15@gmail.com*

<sup>2</sup> *Federal State Institution of Science Institute of Thermal Physics. S.S. Kutateladze, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 630090, Novosibirsk, prospect of Lavrentjev-1,, E-mail: shtork@itp.nsc.ru*

## FLAME STUDY IN A MODEL OF MESOSCALE COMBUSTION CHAMBER.

An experimental study of combustion in a cylindrical meso-scale combustor with a strong swirling of pre-mixed propane-air mixture was made. We measured the basic parameters of the flame at the chamber exit: temperature profile along the cylindrical tube chamber, the gas composition of the reaction products of combustion, the emission spectrum of the flame at the base of the camera. The ultimate goal of the studies is to find stable combustion regimes in small-sized combustion chambers.

SWIRLING FLOW, COMBUSTION, SELF-SUSTAINING MODE, RECIRCULATION ZONE, GAS ANALYSIS OF COMBUSTION PRODUCTS, LDA MEASUREMENTS.