

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В КАНАЛАХ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ С ЗАКРУЧЕННЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ

Бурова О. В.,

Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А. В.

Сибирский Федеральный Университет

Быстрое развитие малогабаритных электромеханических систем (MEMS) и устройств, обеспечивающих мобильность и связь современного человека, нуждается в особых требованиях от источников питания. Мезомасштабная и микромасштабная камера сгорания рассматривается как потенциальное решение для многих энергопотребляющих систем, таких как источники питания для портативных устройств и двигатели малых транспортных средств.

Среди других систем преобразования энергии, система на основе термофотопреобразователей (TPV) является практическим и осуществимым подходом к непосредственному преобразованию энергии излучения в электрическую энергию. Благодаря высокой плотности энергии сжиженных углеводородов (~50 МДж/кг), система TPV способна конкурировать с современными литиевыми аккумуляторами (~0.6 МДж/кг).

Следует указать, что существующие на настоящее время разработки в данной области не имеют законченного характера, позволяющего изготавливать реально работающие малогабаритные источники питания. Причиной этого является наличие серьезных принципиальных трудностей, возникающих при переходе к малоразмерным камерам сгорания, а именно:

1. Увеличение отношения площадь/объем приводит к повышенным тепловым потерям на стенках камеры сгорания, соответственно, к затуханию пламени;
2. Небольшие размеры предполагают короткое время пребывания и плохое перемешивание топлива и окислителя, соответственно, низкую полноту выгорания топлива;
3. Повышение удельной мощности приводит к повышенной теплонапряженности стенок камеры, что накладывает требования к использованию особых термостойких материалов;
4. Проблема контроля выброса вредных примесей особенно важна, если речь идет об источниках питания для персональных устройств, работающих в непосредственной близости от человека;
5. С уменьшением размеров происходит уменьшение КПД устройства;
6. Трудность получения объективной экспериментальной информации о процессах, происходящих в узких каналах.

Требования к альтернативным системам генерации электроэнергии растут, в то время как улучшения в технологии аккумуляторов приближаются к пределу. Плотность энергии углеводородного и водородного топлив превышает аналогичный показатель ионно-литиевой батареи [1]. Вследствие чего, последние исследования направлены на разработку компактных систем генерации электроэнергии, основанные на горении вышеупомянутых углеводородных и водородных топлив.

Основной показатель таких устройств, а именно удельная мощность и запас энергии на единицу веса для миниатюрных термохимических источников, может более чем на два порядка превышать аналогичный показатель для электрохимических источников, в частности, традиционных батарей и современных топливных элементов.

Концепция применения микрокамер сгорания основана на том, что мощность на единицу расхода смеси топливо-окислитель определяется скоростью реакции горения, которая в свою очередь определяет скоростью химической реакции, которая не зависит размера. Удельная мощность камеры сгорания должна увеличиваться при уменьшении размера, поскольку мощность на единицу расхода смеси уменьшается пропорционально площади, при этом вес устройства – пропорционально объему. Из данного закона следует, что удельная мощность камеры сгорания должна линейно расти с уменьшением размера [1]. Этот факт является мотивацией для исследований, направленных на развитие микрокамер сгорания.

Также стоит упомянуть, что существующие на настоящее время разработки в данной области не имеют законченного характера, позволяющие производство реально работающего малогабаритного источника питания. Причиной этого является наличие серьезных принципиальных трудностей, возникающих при переходе к мелкомасштабным камерам сгорания.

К основной проблеме, препятствующей организации устойчивого сжигания в камерах малого масштаба, следует отнести проблему высоких теплотерь из пламени. Одним из эффективных способов преодоления этой проблемы является повышение температуры стенок камеры сгорания за счет рециркуляции тепла.

В данной работе была выбрана цилиндрическая геометрия в качестве модельного рабочего участка для исследования процессов горения в миниатюрных камерах сгорания, что является оправданным как с научной точки зрения, поскольку позволит сравнение полученных данных с имеющимися в литературе результатами математического и экспериментального моделирования [2], так и с точки зрения возможностей непосредственного приложения полученных результатов к практическим устройствам, например, систем TPV [3], по данной работе также был проведен ряд экспериментов, что и легло в основу исследования.

Относительно характерных масштабов микрокамер сгорания в литературе нет единой классификации микро-генераторов электричества по характерным размерам и мощности. Характерные размеры в пределах 1-2 см для микрокамеры сгорания и соответствующая им характерная мощность относятся к промежуточному диапазону между крупномасштабными промышленными и лабораторными горелками и устройствами субмиллиметрового масштаба, для которых строго говоря применим термин «микро». Горелочные устройства сантиметровой размера или мезомасштаба используются, с одной стороны, поскольку портативные источники питания этого масштаба имеют свою область практического применения; с другой стороны, экспериментальное исследование процессов горения в каналах сантиметровой диапазона представляется гораздо более доступным, что дает возможность получения детальной информации о внутренней структуре реагирующего течения.

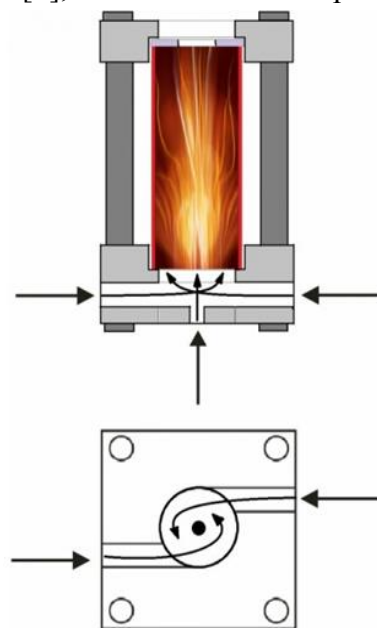


Рис. 1. Схема горелочного устройства с тангенциальным завихрителем

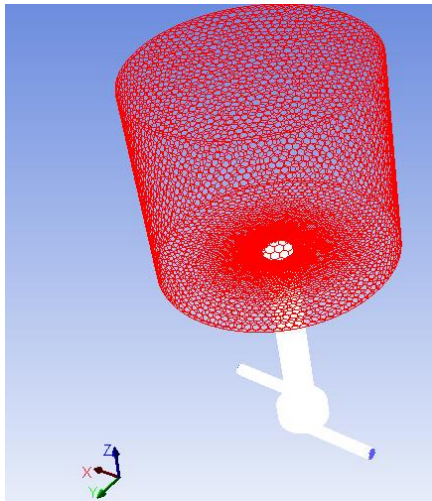


Рис.2. Геометрия и сетка, использовавшаяся при моделировании задачи

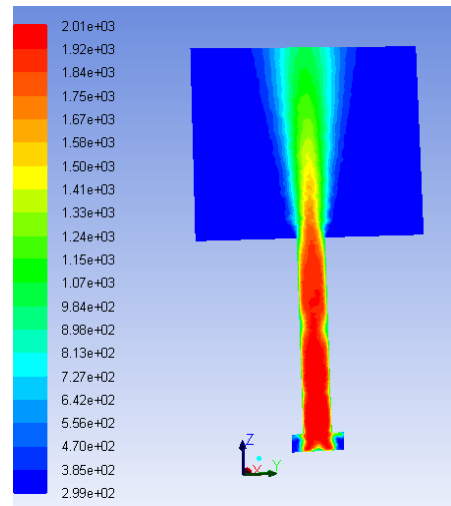


Рис.3. Распределение пламени по длине горелки

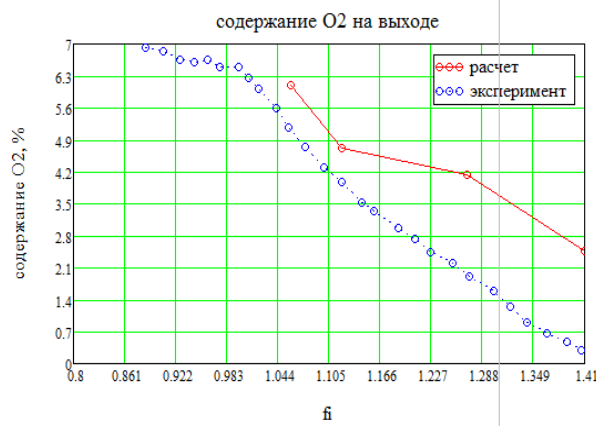


Рис. 4. Содержание кислорода в зависимости от расходов пропана и воздуха.

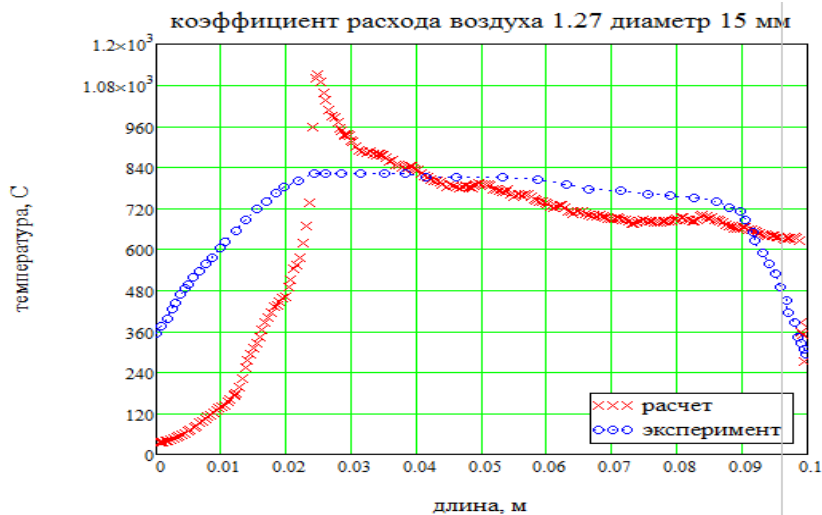


Рис. 5. Распределение температуры по стенке горелки

На сегодняшний день существует огромное количество моделей горения. С целью тестирования и адаптации модели горения в данной работе проведено численное моделирование закрученного турбулентного пламени.

Моделирование проведено при помощи пакета программ Fluent. Для расчета использовалась SST модель турбулентности и EDC модель горения. Рабочая сетка порядка 100000 узлов (рис. 2). Результаты численного моделирования сопоставимы с данными натурального эксперимента, проведенного в Институте Теплофизики СО РАН в лаборатории С. И. Шторка.

Пример распределения пламени по длине горелки представлен на рисунке 3. На рисунках 4 представлено содержание кислорода для трубки диаметром 15 мм и расхода пропана 0.075 л/мин. На графике 5 представлено распределение температуры по стенке горелки в расчете и в эксперименте, наблюдается хорошее согласование с экспериментом

- 1 Dunn-Rankin D., Leal E.M., Walther D.C. Personal power systems // Prog. Energy Combust. Sc. – 2005. - Vol. 31. - P. 422-465.
- 2 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.
- 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.