

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Идрисов Д.В., Матвеев С.С., Матвеев С.Г., Коломзаров О.В., Литарова А.А., Попов А.Д.,  
Новичкова С.С., Семенихин А.С., Савченкова А.С.  
Самарский университет, г. Самара, [idrisov57@yandex.ru](mailto:idrisov57@yandex.ru)

*Ключевые слова:* газотурбинные установки, камера сгорания, нормальная скорость распространения пламени, метан-водородная смесь, граница бедного срыва пламени, проскок пламени.

Одной из глобальных проблем является изменение климата, вызванное увеличением доли парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу Земли. В связи с этим в последнее время в России и за рубежом большое внимание уделяется вопросу использования альтернативных источников энергии, используемых в промышленных газотурбинных установках (ГТУ). В частности, обсуждается использование водорода и метан-водородных смесей, что позволит существенно уменьшить количество выбросов  $\text{CO}_2$ . В настоящее время мировой тренд направлен на планомерное снижение выбросов  $\text{CO}_2$ , которые сейчас составляют в среднем 500 г  $\text{CO}_2$  на 1 кВт\*час. В обозримом будущем планируется снизить эмиссию  $\text{CO}_2$  до 340 г  $\text{CO}_2$  на 1 кВт\*час, а в перспективе до 100 г  $\text{CO}_2$  на 1 кВт\*час.

Помимо снижения уровня  $\text{CO}_2$  также большая работа ведётся по снижению и нормировки вредных выбросов. Одним из основных источников загрязнения окружающей среды являются транспортные системы, в частности, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) и созданные на их базе наземные установки. В соответствии с международными и отечественными стандартами основными нормируемыми компонентами являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), оксиды углерода (СО), несгоревшие углеводороды ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ) и сажа. Мероприятия по снижению образования вредных выбросов в основном сводятся к использованию технологий малоэмиссионного горения, значительная часть которых использует метод сжигания бедных предварительно подготовленных смесей. Однако при этом возникают проблемы устойчивого горения, а именно, сужаются границы по бедному срыву пламени.

Использование водорода ( $\text{H}_2$ ) в топливе сопровождается рядом преимуществ. Добавка водорода позволяет решить проблему устойчивого горения при бедных и сверхбедных смесях. Но при этом возникает ряд проблем, в частности, локальный перегрев деталей в системе сгорания и риск проскока пламени в зону подготовки топливовоздушной смеси. Создание оптимальной схемы процесса сгорания с использованием водорода в качестве добавки к основному (углеводородному) горючему является предметом исследований, проводимых в настоящее время, и будет оставаться актуальным в обозримой перспективе ввиду экологических преимуществ водорода.

Для проектирования новых горелочных устройств, стабильно работающих на метано-водородных смесях, необходима верифицированная методика, позволяющая определить границы устойчивой работы камер сгорания, в частности модели возникновения проскока пламени, при горении метано-водородных смесей.

В данной работе осуществляется разработка метода определения проскока пламени при горении метано-водородного топлива в модельной камере сгорания. Для этого был сформирован комплекс экспериментальных установок и моделей для исследования механизмов горения метано-водородных топлив. Далее была разработана модель нормальной скорости распространения метано-водородного пламени в зависимости от температуры, давления, состава смеси и доли содержания водорода в топливе. Данная модель была разработана на основе расчётов в программном пакете Ansys Chemkin с использованием детальной химической кинетики в широком диапазоне исследуемых параметров и валидирована на собственных экспериментальных данных. В работе экспериментально

исследована граница устойчивой работы модельного горелочного устройства в закрученном потоке. Получено, что добавка водорода по объёму на 80% приводит к расширению границ бедного срыва пламени в среднем на 50% по сравнению с природным газом, но при этом возрастает вероятность проскока пламени. При горении метана значение коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ) при проскоке составило 0.5, тогда как при горении чистого водорода – порядка 3.0. На основе RANS подхода в трёхмерной постановке с использованием пользовательской функции для скорости пламени разработана модель расчёта проскока метано-водородного пламени. Для валидации расчётные исследования сравнивались с полученными в эксперименте значениями. Из представленных результатов видно, что прогнозирование бедного срыва пламени при трёхмерном моделировании качественно согласуется с результатами, полученными в эксперименте, однако максимальное отклонение составляет порядка 40%. Прогнозирование проскока пламени при трёхмерном моделировании качественно и количественно согласуется с результатами, полученными в эксперименте, и максимальное отклонение составляет 14%. Таким образом, разработанная математическая модель может быть использован для прогнозирования явления проскока пламени. Апробация разработанного метода была проведена на модельной камере сгорания. На этапе предварительного проектирования согласование расчетных и экспериментальных данных является удовлетворительным

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10205, <https://rscf.ru/project/22-79-10205/>.

### **Сведения об авторах**

Идрисов Д.В., м.н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: применение метано-водородных смесей и водорода в камерах сгорания газотурбинных установок.

Матвеев С.С., к.т.н., старший преподаватель кафедры теплотехники и тепловых двигателей, с.н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: образование и выброс загрязняющих веществ при сжигании углеводородных топлив, применение метано-водородных смесей и водорода в камерах сгорания газотурбинных установок.

Матвеев С.Г., к.т.н., доцент, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, в.н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: экспериментальные исследования и моделирование процессов горения применительно к камерам сгорания ГТД и ГТУ, образование и выброс загрязняющих веществ при сжигании углеводородных топлив, применение метано-водородных смесей и водорода в камерах сгорания газотурбинных установок.

Коломзаров О.В., ассистент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: экспериментальные исследования КС ГТД.

Литарова А.А., магистрант, лаборант-исследователь НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: моделирование процессов в камерах сгорания ГТД и ГТУ.

Попов А.Д., аспирант, лаборант-исследователь НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: моделирование процессов в камерах сгорания ГТД и ГТУ.

Новичкова С.С., аспирант, лаборант-исследователь НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: моделирование процессов в камерах сгорания ГТД и ГТУ.

Семенихин А.С., к.т.н., с.н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: кинетическое моделирование процессов горения.

Савченкова А.С. к.х.н., доцент кафедры неорганической химии, с.н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: определение путей и констант

скоростей индивидуальных реакций квантово-химическими методами, исследование процессов окисления индивидуальных компонентов органических топлив.

**DETERMINATION OF THE STABILITY LIMITS OF THE METHANE-HYDROGEN FUEL IN COMBUSTION CHAMBERS OF GAS TURBINE ENGINES AND POWER PLANTS**

Idrisov D.V., Matveev S.S., Matveev S.G., Kolomzarov O.V., Litarova A.A., Popov A.D.,  
Novichkova S.S., Semenikhin A.S., Savchenkova A.S.  
Samara University, Samara, Russia, [idrisov57@yandex.ru](mailto:idrisov57@yandex.ru)

*Keywords: gas turbine power plants, combustion chamber, laminar flame speed, methane, hydrogen mixture, lean blowout limit, flame flashback.*

The aim of this study is to develop and validate a method for calculating the flashback in the combustion chambers of gas turbine engines and power plants during the combustion of methane-hydrogen fuel.