

## ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

**Борзов С.М.<sup>1)</sup>, Козик В.И.<sup>1)</sup>, Шараборин Д.К.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>2)</sup> Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Применение все более жестких законодательных ограничений на вредные выбросы энергетическими установками и рост цен на органическое сырье стимулирует поиск новых концепций и конструктивных решений, обеспечивающих экологически чистое и эффективное использование топлива. Повышение эффективности и безопасности процесса сжигания зависит, в первую очередь, от расширения диапазона устойчивого горения вблизи границы срыва пламени (избегая при этом интенсивных резонансных автоколебаний, генерируемых, в частности, за счет модуляции подвода топливно-воздушной смеси акустической волной, индуцированной в зоне горения) и требует разработки методов бесконтактной диагностики процессов, происходящих в зоне смешения и горения. В частности, один из современных методов низкоэмиссионного сжигания топлива в газотурбинных установках основан на применении горения обедненных предварительно перемешанных топливно-воздушных смесей [1]. Подобная организация горения позволяет полностью избежать образования в топочном пространстве высокотемпературных зон с присутствием свободного кислорода и как следствие приводит к радикальному снижению окислов азота в дымовых газах. Однако практическое использование данного подхода затрудняется возможностью кратковременного прекращения горения в результате срыва пламени потоком. Такая ситуация чрезвычайно опасна и фактически означает, что при отсутствии пламени через горелочное устройство в топочное пространство продолжает поступать и накапливаться углеводородо-воздушная смесь в близком к оптимальному соотношению кислорода и горючего. Подобная смесь взрывоопасна и ее возгорание может привести к серьезной аварии.

Задача обеспечения безопасности процессов горения на промышленных объектах в настоящее время решается системами непрерывного контроля наличия пламени на каждом горелочном устройстве [2]. При срыве пламени такие системы должны максимально быстро отреагировать и выдать сигнал на механизмы, управляющие подачей топлива. Каждое такое событие приводит к необходимости повторного запуска установки и к связанным с этим потерям энергии и топлива. Общим недостатком существующих систем контроля является то, что они ориентированы лишь на определение факта отсутствия пламени и не обеспечивают возможности его прогнозирования.

Данная работа направлена на разработку методов контроля устойчивости горения органических топлив в высокотемпературных энергетических установках, упор сделан на выявление опасности погасания пламени при горении предварительно перемешанных компонент.

В настоящее время известно большое количество методов контроля процессов горения. По принципам функционирования их можно разделить на два класса: контактные и бесконтактные. Первые используют информацию, полученную от физических устройств, имеющих непосредственный контакт с пламенем или высокотемпературными объемами. Вторые основаны на регистрации различными датчиками излучения, возникающего в процессе горения. В свою очередь по способу получения данных контактные и бесконтактные методы делятся на активные и пассивные. В активных методах контроля осуществляется специальное воздействие на определенные характеристики пламени с целью последующего селективного выделения информации, однозначно характеризующей его наличие или отсутствие. В пассивных методах измеряются собственно характеристики излучения пламени.

Пассивные бесконтактные методы имеют определенные преимущества, поскольку основаны на регистрации различных параметров оптического излучения (интенсивность, частота пульсаций, спектральный состав) и, следовательно, не вносят возмущений в газовый поток, более технологичны и эксплуатационно эффективны, а также применимы в широком

температурном диапазоне. Расчеты показывают, что даже небольшие потери тепла, которые трудно количественно измерить в эксперименте, могут быть ответственными за расхождения между экспериментальными измерениями и расчетными значениями [3].

Стационарное ламинарное горение предварительно перемешанной смеси достаточно подробно исследовано. Известно, что в случае ламинарного углеводородного пламени фронт горения представляет собой очень узкую светящуюся зону. Это свечение обусловлено в первую очередь излучением возбужденных продуктов [4]. Спектр излучения состоит из отдельных линий и полос. Интенсивность этих линий характеризует условия, в которых осуществляются реакции, и может быть использована для решения задачи определения режима горения [5,6].

Описание же процессов турбулентного горения предварительно перемешанной смеси является не тривиальной задачей. Наиболее популярный подход заключается в представлении такого пламени как ансамбля деформированных ламинарных пламен [7]. Согласно этому представлению движение фронта пламени предварительно перемешанной смеси является суперпозицией процесса распространения отдельных ламинарных пламен и процесса конвективного (или турбулентного) движения потока. Турбулентность осуществляет конвективный перенос компонент топлива в сторону фронта пламени. При этом в каждом микрообъеме горение топлива идет по законам ламинарного горения, и фронт представляет собой достаточно широкую зону. Фактически горение при этом является серией микровзрывов, обладающей определенными статистическими характеристиками. Частотные параметры пульсаций излучения такого пламени, очевидно, также будут отражать данные характеристики. С ростом интенсивности турбулентности конечные скорости химических превращений не дают возможности производить продукты настолько же быстро, насколько топливо подводится в зону реакции; в результате не полностью сгоревшие продукты удаляются из зоны реакции, что приводит к потерям тепла. Как следствие, температура пламени падает, и скорость реакции снижается. Соответственно изменяются параметры пульсаций излучения. При некоторой температуре (около 1700К для углеводородных топлив) полная скорость образования радикалов становится отрицательной и пламя неожиданно гаснет. (Данная ситуация называется срывом пламени.) Если же скорость подачи топливной смеси оказывается меньше чем интегральная скорость фронта пламени возникает другая опасность - опасность смещения фронта внутрь горелочного устройства. Эта ситуация называется проскоком.

Таким образом, представляется перспективной разработка методов контроля устойчивости горения, основанных на определении параметров пульсаций излучения и положения фронта пламени. При чем опыт показывает что, для понимания таких сложных процессов как горение, как правило, недостаточно точных измерений какого-либо одного параметра, более информативным является анализ результатов измерения нескольких параметров, даже если точность каждого из них не очень высока [7].

Для исследования трансформации оптических свойств излучения пламени в различных режимах горения выполнены проектирование и монтаж многофункционального экспериментального огневого стенда. Стенд состоит из регулируемых систем подачи топлива и воздуха, смесителя и горелочного участка, оснащен аппаратурой бесконтактных измерений частотных, пространственных и спектральных характеристик пламени. В качестве объекта исследования в лабораторных условиях взято пламя пропановоздушной смеси. Пропан подается из стандартного баллона. Окислитель (атмосферный воздух комнатной температуры) подается вентилятором. Расходы воздуха и пропана контролируются блоками регулирования и измерения, включающими в себя системы клапанов и ротаметров, и могут варьироваться в пределах 0-1.5л/с и 0-0.2л/с, соответственно. Подготовка топливно-воздушной смеси производится в смесителе. Стенд комплектовался горелочным участком со сменными соплами. Внутренние стенки сопел специальным образом профилировались для формирования равномерного распределения скорости потока на срезе.

Исследования спектрального состава излучения пламени углеводородо-воздушных смесей в различных режимах горения проведены с использованием многоканального анализатора атомно-эмиссионных спектров «МАЭС» [8]. В экспериментах использовались прямоточные горелки и горелки с закручивающимся потоком насадками с соплами различного диаметра. Измерения выполнялись при направлении визирования перпендикулярном оси факела. При

этом в поле зрения анализатора оказывалась первичная зона факела, являющаяся наиболее информативной в плане устойчивости горения.

Для детального исследования трансформации спектральных свойств пламени данной пространственной области была осуществлена регистрация спектров  $S_\alpha(\lambda)$  излучения при различных соотношениях воздух/газ. В каждом эксперименте при фиксированном расходе газа осуществлялось ступенчатое увеличение расхода воздуха вплоть до срыва пламени.

Анализ полученных спектров и их сравнение с известными спектрами промежуточных и конечных продуктов горения показывают, что регистрируемое свечение пламени обусловлено излучением радикалов ОН (308-320нм), СН (431-438нм) и  $C_2$  (467-470; 513-516; 559-564нм). Причем, соотношение между интенсивностью излучения отдельных полос меняется в зависимости от параметров горящих потоков. В частности, соотношение между интенсивностью полос радикалов СН и  $C_2$  существенно изменяется.

Для выделения из интенсивности полного свечения пламени интенсивности свечения промежуточных продуктов горения (радикалов ОН, СН и  $C_2$ ) и получения зависимости от  $\alpha$  осуществлена обработка полученных спектров  $S_\alpha(\lambda)$ . Для этого вычислялась интегральная интенсивность в полосах свечения радикалов и в диапазонах между ними:

$$P_i(\alpha) = \int_{\Delta\lambda} S_\alpha(\lambda) d\lambda$$

Затем определялась собственная светимость радикалов:

$$R_i(\alpha) = P_i(\alpha) - (P_{i-1}(\alpha) + P_{i+1}(\alpha))/2$$

Типичные зависимости интенсивности излучения радикалов от показателя стехиометрии  $\alpha$  для прямоточных горелок показаны на рис. 1. Видно, что излучение радикала  $C_2$  максимально в области  $\alpha$ , близкой к единице. Максимум излучения радикала СН смещен в область более бедных смесей. Уменьшение интенсивности излучения радикала ОН практически не наблюдается вплоть до срыва пламени. Сам срыв пламени происходит действительно «внезапно». Для разных расходов газа и диаметров горелки срыв происходит при различном значении показателя стехиометрии, при этом характер зависимости интенсивности излучения указанных радикалов от  $\alpha$  не меняется.

При горении закрученной струи ситуация существенно отличается от случая прямоточных горелок. Здесь пламя уже не стабилизируется на сопле горелки, а может перемещаться вдоль ее оси. Поэтому результаты измерений интенсивности излучения зоны у среза горелки напрямую зависят от положения фронта пламени. На рис. 2 приведены типичные зависимости интенсивности излучения радикалов ОН, СН и  $C_2$  от показателя стехиометрии при различном расходе газа для горелки с закручивающий поток насадкой. Следует отметить, что во время проведения данного эксперимента при значениях  $\alpha=0.84$  пламя было близко к проскоку. Это привело к резкому уменьшению интенсивности излучения радикалов в поле зрения анализатора. Последующее увеличение подачи воздуха (до  $\alpha=1.02$ ) позволило избежать проскока и привело к увеличению интенсивности излучения до соответствующего показателю стехиометрии уровню. Дальнейшее увеличение расхода воздуха ( $\alpha=1.13$  и более) привело к смещению фронта пламени на значительное расстояние от среза горелки и соответственно к резкому уменьшению регистрируемой интенсивности, в результате чего последовавший после этого срыв пламени оказался вполне предсказуем.

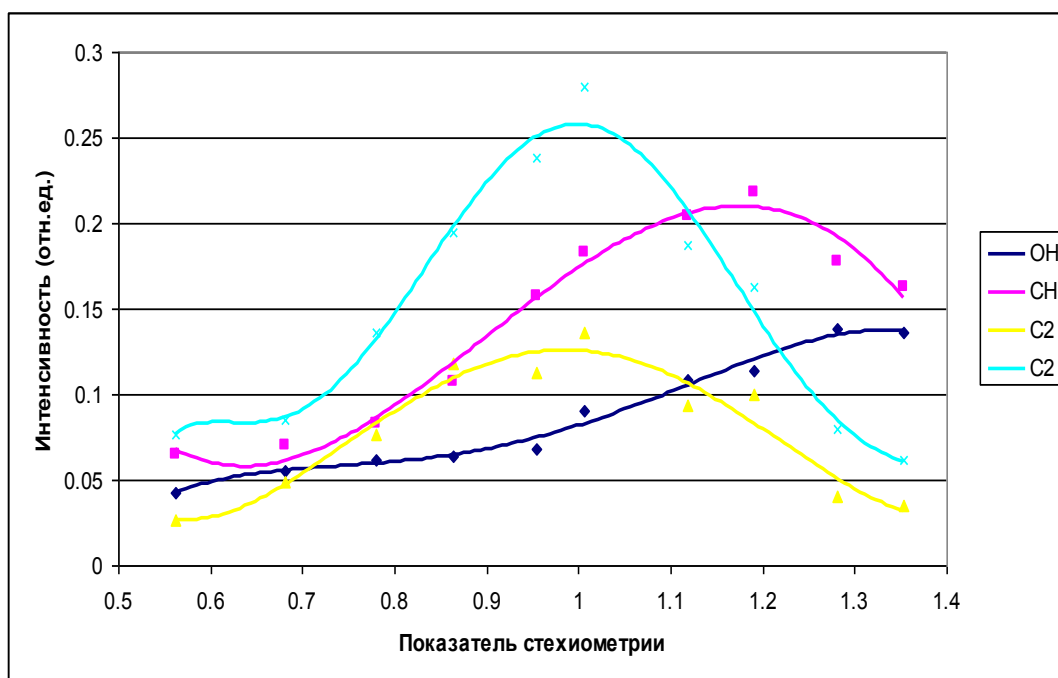


Рис. 1 - Интенсивность излучения радикалов OH (308-320 нм), CH (430-438 нм) и C<sub>2</sub> (467-472, 513-517 нм) в зависимости от показателя стехиометрии при расходе газа 8 мл/сек для прямооточной горелки с диаметром сопла 10 мм.

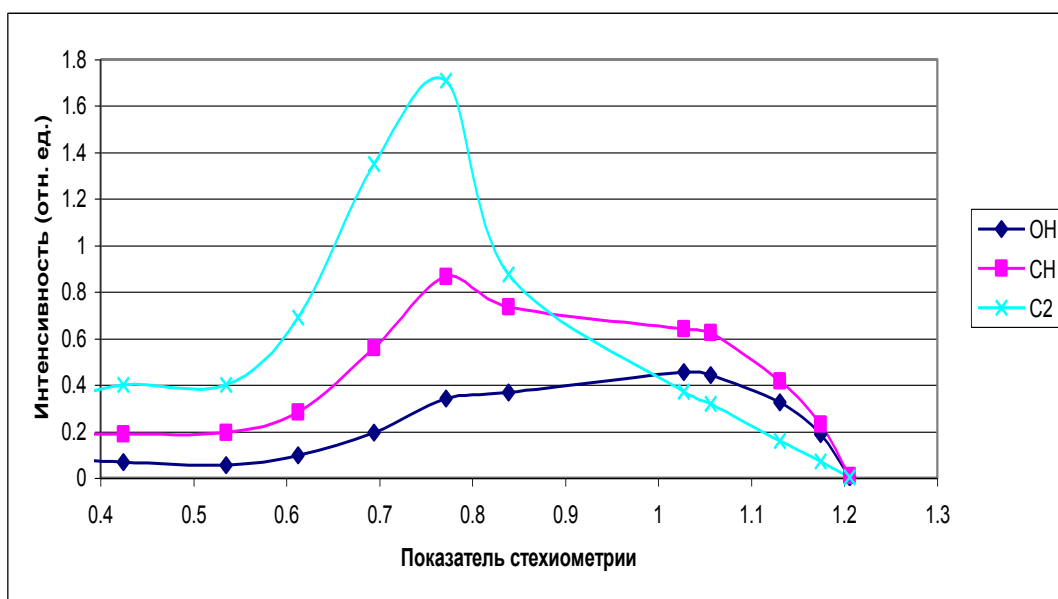


Рис.2 - Интенсивность излучения радикалов в зависимости от показателя стехиометрии при расходе газа 14 мл/сек для горелки с закручивающей поток насадкой с диаметром сопла 15 мм.

Погасание пламени при проведении данных экспериментов для прямооточных горелок происходило в результате отрыва пламени. Для горелок с закручивающими насадками в зависимости от параметров потока происходил либо отрыв пламени, либо проскок - смещение зоны горения внутрь горелки. В последнем случае в спектре излучения пламени появлялись дублеты спектральных линий натрия (589.0, 589.6 нм) и калия (766.5, 769.9 нм), входящих в состав антикоррозионных покрытий. Это вызвано тем, что смещение фронта горения внутрь горелки приводит к разогреву сопла и разрушению его газовым потоком. Типичный спектр излучения для этого случая приведен на рис. 3 (дублет спектральных линий натрия не разрешается).

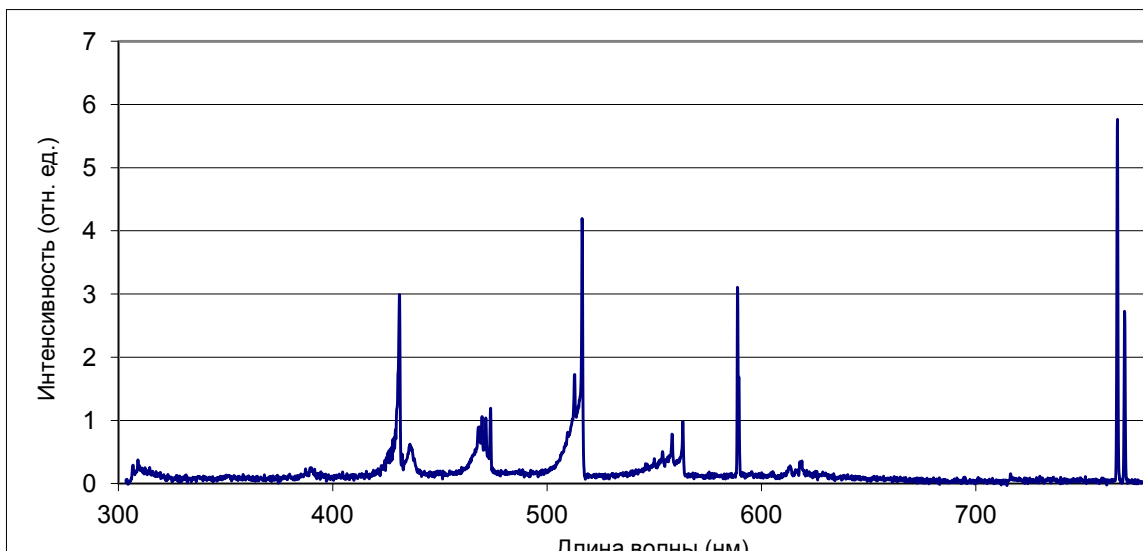


Рис. 3 - Спектр излучения пламени со смещением зоны горения внутрь горелки

Присутствие в спектре излучения пламени линий натрия и калия подтверждается и экспериментами на промышленных установках. На рис.4 представлен спектр излучения пламени зарегистрированный на водогрейном котле ПТВМ-50 тепловой станции ТС1 ГУП УЭВ ННЦ СО РАН. В данном агрегате интенсивность указанных линий в спектре излучения может служить показателем степени разогрева горелочных устройств.

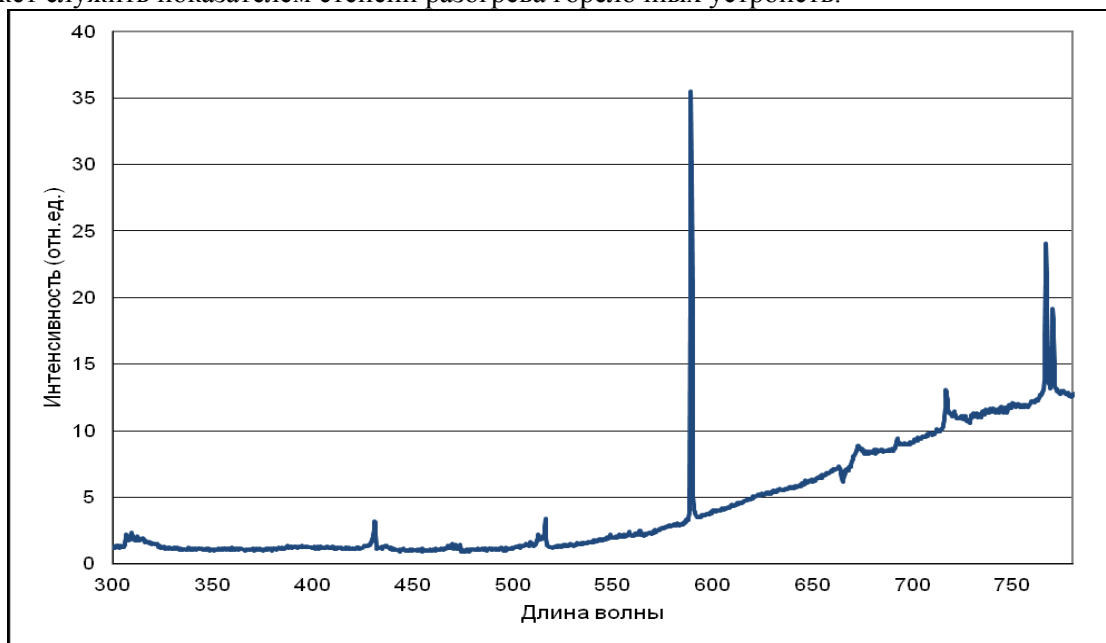


Рис. 4 - Спектр излучения пламени в промышленном агрегате

Исследования параметров пульсаций излучения пламени в различных режимах горения проведены на разработанном огневом стенде с использованием ФЭУ ультрафиолетового диапазона спектра. В каждом эксперименте при фиксированном расходе газа осуществлялось ступенчатое увеличение расхода воздуха вплоть до срыва пламени. Измерения выполнялись при направлении визирования перпендикулярном оси факела.

Измерение интенсивности излучения осуществлялось с частотой 1кГц, оценка уровня пульсаций выполнялась путем расчета среднеквадратичного отклонения полученного распределения значений. Анализ регистрируемых данных показал, что характер пульсаций пламени для различного типа горелок существенно отличается. Так, для прямоточных горелок (рис.5) уровень пульсаций постепенно увеличивается, а затем также плавно снижается при

увеличении количества воздуха в смеси, для горелок же с завихрителем при приближении к срыву наблюдается существенный рост пульсаций (рис.6).

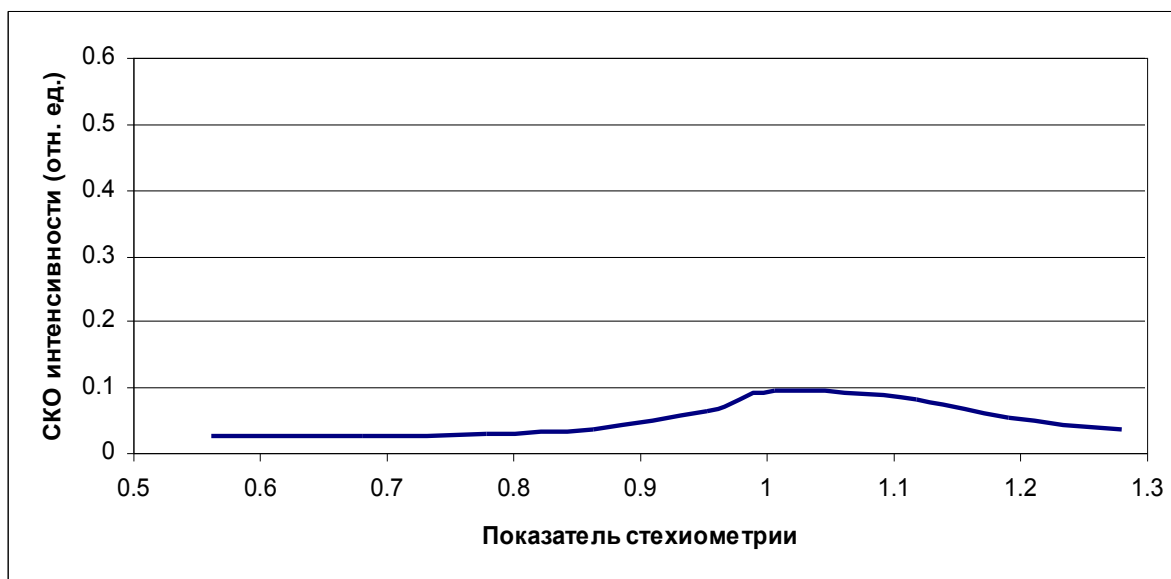


Рис.5 - Типичная зависимость интенсивности пульсаций УФ излучения пламени в зависимости от показателя стехиометрии для прямоточной горелки

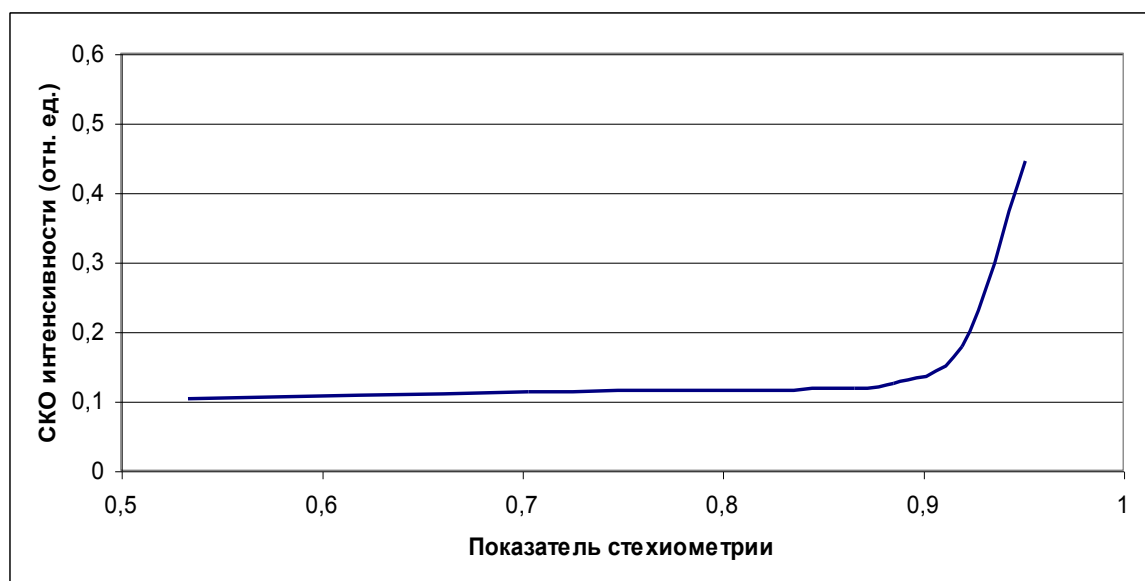


Рис. 6 - Типичная зависимость интенсивности пульсаций УФ излучения пламени в зависимости от показателя стехиометрии для горелки с завихрителем

Таким образом, по результатам экспериментов сделаны следующие выводы:

- опасность срыва/проскока пламени для горелок с завихрителем может быть установлена по уменьшению интенсивности свечения радикалов в зоне нормального положения фронта;
- опасность срыва факела, кроме того, может быть установлена по существенному увеличению интенсивности пульсаций излучения пламени;
- смещение фронта пламени внутрь горелочного устройства (проскок) может быть установлено по появлению в спектре излучения интенсивных линии натрия (589нм) и калия (766.5, 769.9 нм).

Это позволяет осуществлять дистанционный оптический контроль устойчивости горения в условиях, характерных для высокотемпературных энергетических устройств, когда оптический доступ к потоку существенно ограничен и наблюдение может вестись только через отдельные окна.

## Список литературы

1. Bahr, D. Aircraft turbine engine NOx emissions abatement. In Culick, F., Heitor, M. and Whitelaw, J. (Eds.) *Unsteady Combustion*, Kluwer Academic Publ., NATO ASI Series, Vol. E 306, 1995. pp. 234-264.
2. Борзов С.М., Шейшенов Ж.О. Селективная диагностика многофакельного горения в промышленных котлоагрегатах // *Материалы III Всероссийской школы-семинара «Энергосбережение – теория и практика»* (г. Москва, 21-29 сентября 2006 г.), 2006. С. 265-269.
3. Stahl G., Warnatz J. Numerical investigation of strained premixed CH<sub>4</sub>-air flames up to high pressures // *Comb. Flame* 85:285, 1991
4. Гейдон А. Спектроскопия пламен.-М.: ИЛ, 1959.
5. Борзов С.М., Гаркуша В.В., Козик В.И., Михеев В.П., Потатуркин О.И., Шушков Н.Н. Селективная диагностика процессов горения в многорелочных энергоблоках // *Теплофизика и аэромеханика*, 2006, № 2.
6. Борзов С.М., Васьков С.Т., Потатуркин О.И., Шейшенов Ж.О. Селективная диагностика многофакельного горения с использованием имитационного моделирования // *Автометрия*, 2008 №2.
7. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А.Власова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
8. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров / Лабусов В.А., Попов В.И., Путьмаков А.Н. и др. // *Аналитика и контроль*.- 2005.- том 9.- №2.