

# СТАТИСТИКА И ОБРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЭКС

Булысова Л.А.<sup>1,a</sup>, н.с., Васильев В.Д.<sup>1,a</sup>, н.с.  
<sup>1</sup> ОАО "ВТИ", ул. Автозаводская, д.14, Москва, Россия

## Краткая аннотация.

Статья посвящена изучению процессов, протекающих в малоэмиссионной камере сгорания (МЭКС) со сжиганием предварительно перемешанной топливовоздушной смеси (ТВС). Приведены результаты расчетов на FlowVision и экспериментальных исследований на испытательном стенде ОАО "ВТИ". Расчеты и испытания проведены при расходе, давлении и температуре воздуха на входе до 4,6 кг/с, до 450 КПа и 673 °К, соответственно, и температуре на выходе  $T_3^* \leq 1473^\circ\text{K}$ , топливо - природный газ.

Для различных вариантов раздачи топлива в горелочное устройство исследовано влияние полей концентрации ТВС на выходе из зоны предварительного перемешивания (ЗПП) горелки. Показана связь между экспериментально замеренными эмиссиями  $\text{NO}_x$  и расчетным значением среднеквадратичной неравномерности поля концентрации ТВС на выходе из ЗПП. При более равномерном распределении концентрации ТВС эмиссии  $\text{NO}_x$  слабее зависят от давления, чем при неравномерном.

Показано влияние эпюры распределения топлива на форму и расположение фронта пламени и устойчивость горения. На данной МЭКС проверен ранее полученный расчетный критерий устойчивости и подтверждена эффективность его использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России Соглашение №14.579.0085 от 28 ноября 2014 г.

## Введение

Теории рабочих процессов камер сгорания (КС) посвящены сотни работ ведущих научных и производственных компаний, однако общие подходы к расчету и проектированию малоэмиссионных КС на сегодняшний день отсутствуют. Это связано с тем, что для их реализации необходимы длительная дорогостоящая экспериментальная стендовая доводка и натурные испытания в составе ГТУ. Использование математического моделирования даёт возможность существенно сократить сроки и затраты на разработку и доводку КС, но его эффективное применение в прикладных и фундаментальных исследованиях требует адекватных подходов как по возможностям, так и по правильной оценке происходящих в КС процессов. За последние 20 лет произошел переход от разработки собственных программ для решения узкой задачи к использованию мощных универсальных вычислительных комплексов, распространяемых на коммерческой основе. При разнообразии и сложности программных средств возникает ряд вопросов методического характера: насколько адекватен выбор модели, методов численного решения, размеров расчётной области, топологии и размерности расчётной сетки, требований к сходимости; какова степень достоверности результатов решения?

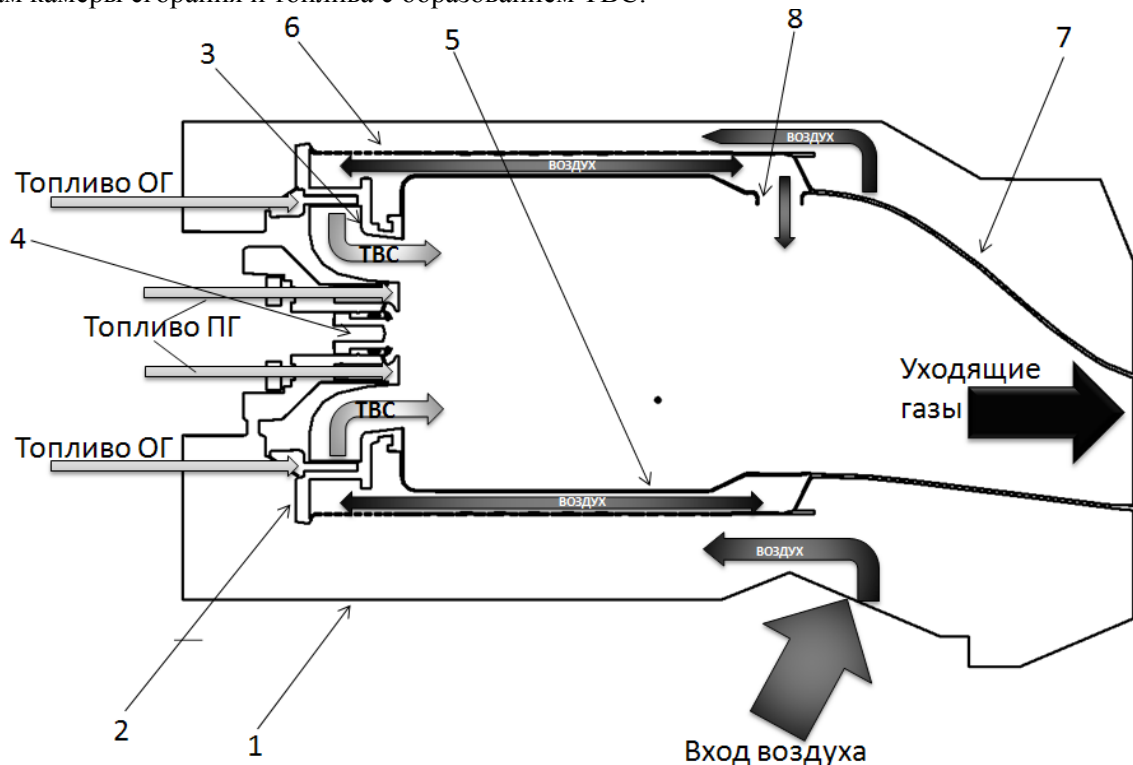
Важным аспектом, который лег в основу работы по изучению процесса малоэмиссионного сжигания, является оптимальное сочетание экспериментов и компьютерного моделирования. С одной стороны, применение современных средств измерения, записи и обработки данных позволяет быстро анализировать результаты испытаний и принимать обоснованные решения по дальнейшим работам. С другой стороны, использование расчетно-вычислительного комплекса, настроенного на расчет задач гидродинамики, теплообмена и горения [1] позволяет проводить верификацию полученных результатов по экспериментальным данным, создавая достоверные расчетные критерии и зависимости и тем самым сокращая время на постановку и проведение эксперимента при выполнении доводочных работ.

Численное моделирование процесса горения сопряжено с большим количеством допущений и упрощений и зависит от заданного количества реакций, выбранной расчетной сетки и других настроек программы. Большое количество степеней свободы в описании процесса горения и ресурсные ограничения компьютеров приводят к низкой точности вычисления значений эмиссий оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ). Поэтому представляет практический интерес возможность связать оценку качества ТВС, легко и достоверно получаемую расчетами, и замеренные в эксперименте эмиссии  $\text{NO}_x$ .

Так же в данной статье приводятся результаты исследований условий возникновения интенсивных пульсаций давления с высоким уровнем амплитуд. Предложен критерий моделирования неустойчивости горения применительно к камерам сгорания, использующим технологию малоэмиссионного сжигания топлива.

## Конструкция и принцип работы МЭКС

На рисунке 1 схематично показан разрез одного горелочного испытательного отсека с размещенной в нем МЭКС. Стрелками показаны места подвода воздуха, распределение его по трактам камеры сгорания и топлива с образованием ТВС.



**Рис. 1** – Разрез расчетной области МЭКС, размещенной в испытательном отсеке:

1 - отсек; 2 - горелочное устройство (ГУ); 3 - основная горелка (ОГ); 4 - пилотная горелка (ПГ); 5 - жаровая труба (ЖТ); 6 - кожух охлаждения; 7 - газосборник (ГЗ); 8 - втулки смесителя.

Конструкция МЭКС типична для камер сгорания, работающих по принципу сжигания предварительно подготовленной топливоздушной смеси (ТВС). Она состоит (см. рис. 1) из: горелочного устройства (ГУ), жаровой трубы (ЖТ), газосборника (ГЗ) и кожуха охлаждения жаровой трубы. ГУ состоит из пилотной (ПГ) и основной (ОГ) горелок. В ПГ имеется осевой завихритель для создания зоны стабилизации пламени и 6 отверстий подачи топлива, расположенных под углом 30 градусов к оси КС. ОГ состоит из радиального завихрителя и канала предварительного перемешивания. Подвод топлива ОГ осуществляется через отверстия в лопатках завихрителя. Для выравнивания поля скорости перед ГУ и интенсификации охлаждения стенок ЖТ применяется перфорированный кожух охлаждения. Охлаждение ГЗ пленочное. Для формирования поля температуры уходящих газов в ЖТ имеются отверстия со втулками для ввода вторичного воздуха.

## Инструментарий

Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде, состоящем из одного горелочного отсека с размещенной в нем МЭКС, измерительного участка, линий подвода топлива к ОГ и ПГ и одной линии подвода воздуха. На выходе из измерительного участка установлено водоохлаждаемое сопло. Производятся следующие замеры: расход, температура и давление на входе по воздуху и топливу; потери давления на ГУ и МЭКС в целом; поле температуры уходящих газов на выходе из ГЗ (пять водоохлаждаемых термопарных гребенок по 5 точек замера на каждой); эмиссии вредных выбросов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) и недожог ( $\text{CH}_4$ ) на выходе из ГЗ (пять водоохлаждаемых пробоотборных гребенок); температуры стенок жаровой трубы и газосборника (12 точек по верхней образующей ЖТ и ГЗ и 10 точек по нижней); пульсации давления (6 датчиков: 5 в объеме ЖТ, один на корпусе отсека).

Расчетные исследования проводились с использованием программного комплекса FlowVision. Применялась прямоугольная расчетная сетка с числом расчетных ячеек 1300000. Максимальный размер ячейки 2.5 мм, минимальный размер 0.04 мм.

## Расчетно-экспериментальная зависимость $\text{NO}_x = f(\sigma_{\text{CH}_4}; P)$

Расчетные и экспериментальные исследования по оценке влияния эпюры концентрации ТВС на эмиссию  $\text{NO}_x$  проведены для 9 вариантов подачи топлива в ОГ МЭКС. Использовались два базовых варианта ОГ - с четырьмя (см. рис. 2а) и с шестью (см. рис. 2б) равнорасположенными по длине

лопатки отверстиями подачи топлива. За счет комбинаций закрытых и открытых отверстий на базе каждого из базовых вариантов было создано еще 7 вариантов неравномерностей поля концентрации ТВС на выходе из ЗПП. Для примера, на рисунке 3 показаны наиболее характерные радиальные эпюры концентрации ТВС на выходе из ЗПП в сечении 1-1 (см. рис 2 а, б): равномерная (рис. 3а); с обогащением к стенке ЗПП (рис. 3б) и с обогащением к центру ЗПП (рис. 3в).

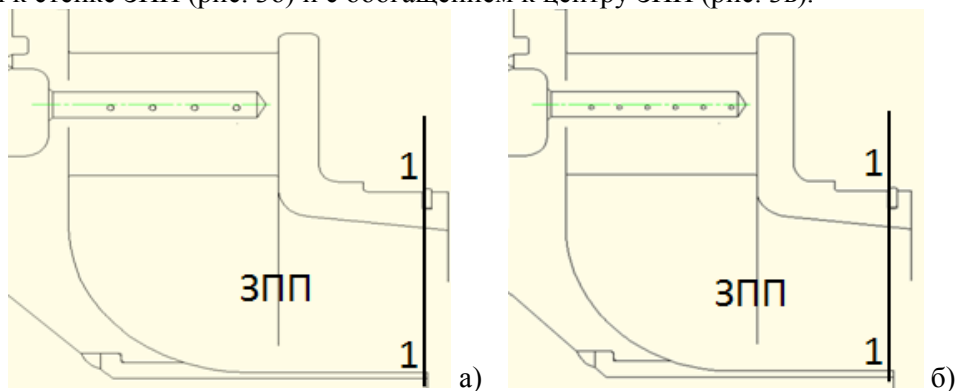


Рис. 2. <Базовые варианты ОГ: а - с четырьмя; б - с шестью равнорасположенными по длине лопатки отверстиями подачи топлива в ЗПП

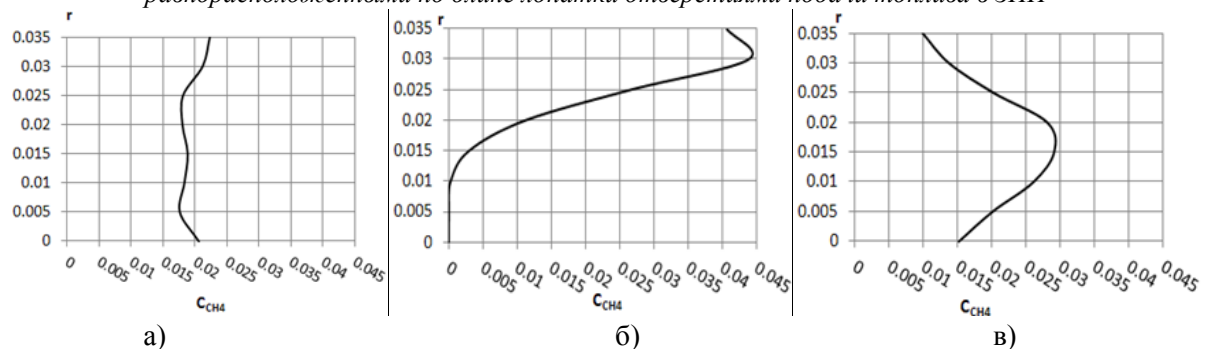


Рис. 3. Характерные радиальные эпюры концентрации ТВС на выходе из ЗПП: а - равномерная; б - с обогащением к стенке ЗПП ; в - с обогащением к центру ЗПП

Расчетные и экспериментальные исследования влияния эпюры концентрации ТВС на эмиссию  $NO_x$  были проведены при следующих входных параметрах по воздуху:  $t_{вх} = 400^\circ C$ ,  $P = 130 - 450$  кПа. Коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 3.02$ . Топливо в пилотную горелку не подавалось ( $PFR = 0\%$ ).

Неравномерность поля концентрации ТВС на выходе из ЗПП в сечении 1-1 (см. рис. 2) оценивалась по формуле (1):

$$\sigma_{C_{CH_4}} = \sqrt{\frac{\int_s (C_{CH_4} - \bar{C}_{CH_4_k})^2 \rho V_n dS}{\int_s \rho V_n dS}} \quad (1)$$

где:

осредненная по потоку величина скалярной переменной  $\bar{C}_{CH_4_k}$ :

$$\bar{C}_{CH_4_k} = \frac{\int_s \bar{C}_{CH_4} \rho V_n dS}{\int_s \rho V_n dS},$$

поток скалярной величины  $\bar{C}_{CH_4}$ :

$$\int_s C_{CH_4} \rho V_n dS,$$

величина конвективного потока:  $\int_s \rho V_n dS$ .

Достоверность расчетов полей концентрации ТВС проверена ранее на модельной КС [2].

Результаты эксперимента и расчета показали высокую полноту сгорания топлива для всех испытанных вариантов (99,9%) на данных режимах работы МЭКС.

На рисунке 4 показана зависимость между экспериментально замеренными эмиссиями  $NO_x$  и расчетными значениями неравномерности.

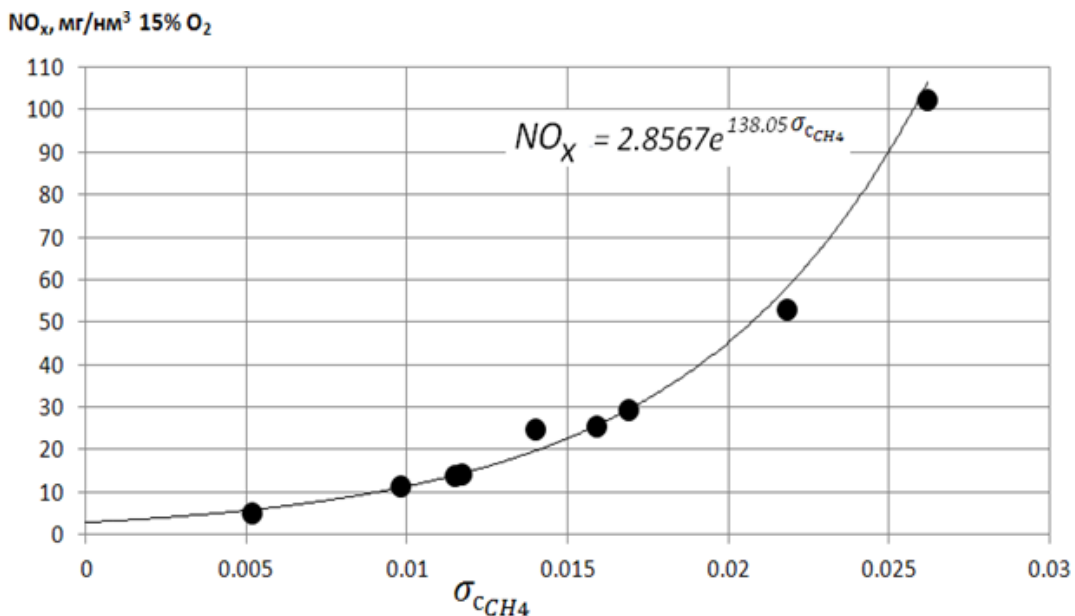


Рис. 4. Расчетно - экспериментальная зависимость  $\text{NO}_x$  от неравномерности поля концентрации ТВС на выходе из ЗПП в сечении 1-1 (см. рис. 2) при постоянных  $P_{\text{вх}}=330$  кПа,  $T_{\text{вх}}=610^\circ\text{K}$ ,  $\alpha=3.02$

Влияние давления на рост эмиссии  $\text{NO}_x$  существенно зависит от неравномерности поля концентрации ТВС на выходе из ЗПП (см. рис. 5).

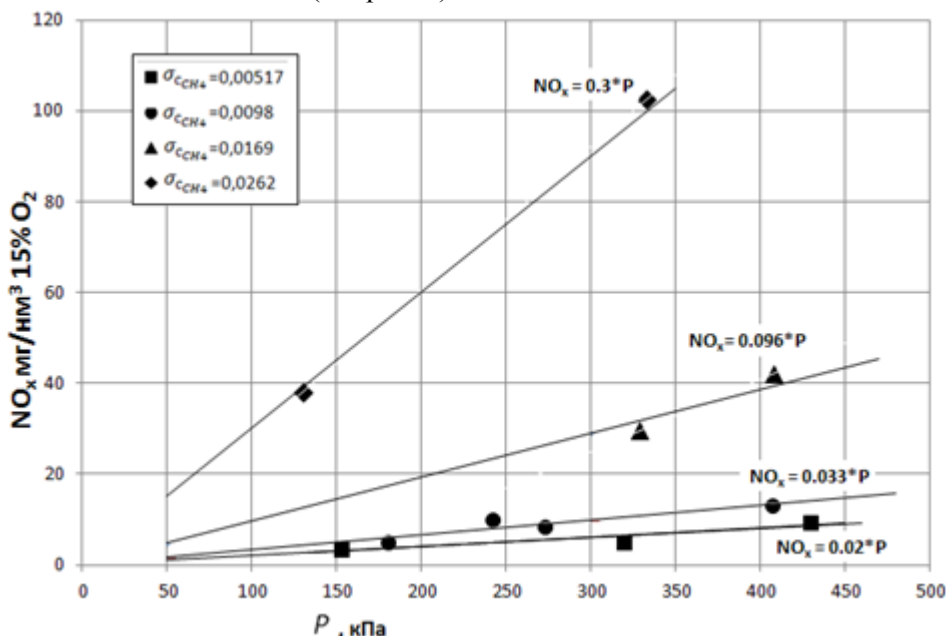


Рис. 5. Расчетно - экспериментальная зависимость  $\text{NO}_x$  от давления воздуха на входе при заданных неравномерностях поля концентрации ТВС на выходе из ЗПП в сечении 1-1 (см. рис. 2) для  $T_{\text{вх}}=610^\circ\text{K}$ ,  $\alpha=3.02$

Из графиков рисунка 5 видно, что чем равномернее поле концентрации ТВС на выходе из ЗПП, тем слабее образование  $\text{NO}_x$  зависит от давления.

Полученные зависимости позволяют на основе численного моделирования процесса образования ТВС в МЭКС, работающих по принципу предварительного перемешивания топлива и воздуха, при ее работе без подачи топлива в ПГ, не проводя расчетов процесса горения, оценивать эмиссии оксидов азота, получаемые на выходе. С ростом давления воздуха на входе эмиссии  $\text{NO}_x$  в зависимости от качества ТВС возрастают не одинаково. В диапазоне давлений 120 - 450 кПа получены зависимости, позволяющие оценить влияние давления на рост образования эмиссий  $\text{NO}_x$  при разном качестве ТВС.

$$\text{Расчетно-экспериментальная зависимость } A' = f\left(\frac{\max grad(t) * \max grad(V)}{d l_{grad}}\right)$$

При проведении экспериментальных исследований МЭКС, на режимах совместной работы ПГ и ОГ, при определенных значениях доли топлива в ПГ (PFR) было обнаружено возникновение пульсации давления с амплитудами 1% - 2% от давления воздуха на входе. Уменьшение доли топлива в ПГ и увеличение его в ОГ при определенном значении PFR приводит к стабилизации

фронта пламени не только на центральной зоне рециркуляции, формируемой за счет крутки потока ОГ, но и на угловой, формируемой за счет внезапного расширения потока. Гидродинамическая картина течения с зонами рециркуляции в ЖТ показана на рисунке 6.

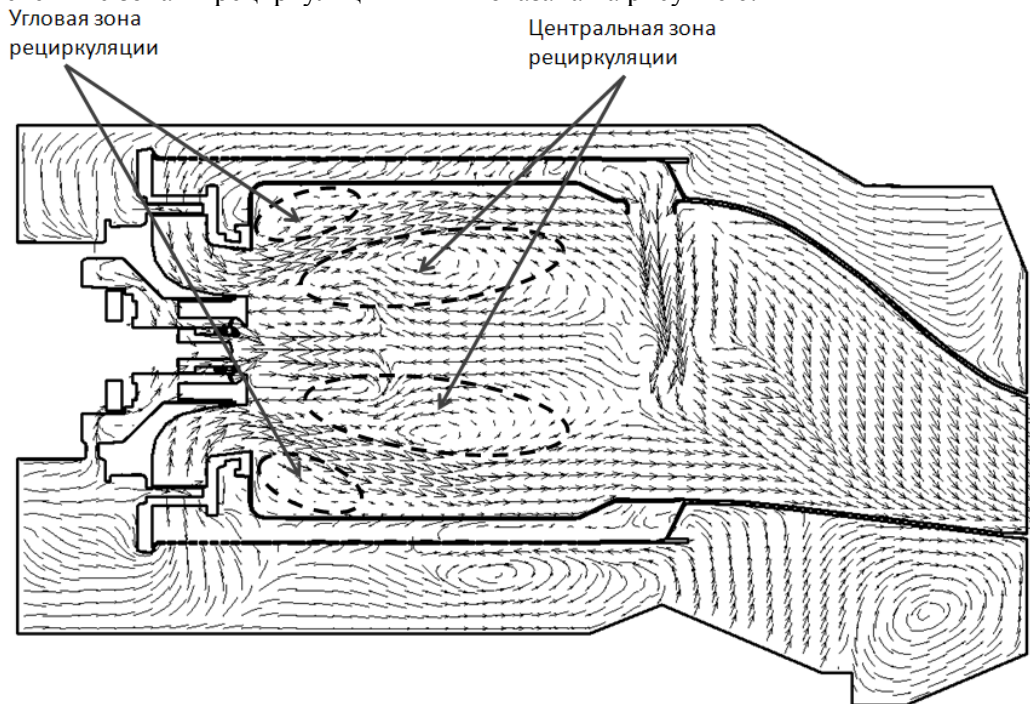


Рис. 6. Поле скоростей течения в продольном сечении МЭКС с обозначением зон рециркуляции потока

На рисунке 7 показаны графики удельного тепловыделения по длине ЖТ при разных значениях доли пилотного топлива. Местоположение максимума удельного тепловыделения характеризует расположение фронта пламени по длине ЖТ [2, 3]. Из рисунка 7 видно, что при уменьшении доли пилотного топлива максимум тепловыделения смещается к ГУ. При значении доли топлива 25% (кривая 2 на рис.7) график удельного тепловыделения искажен и имеет два максимума, обусловленных деформацией фронта пламени и его стабилизацией не только на центральной зоне рециркуляции, как это было при PFR=41% (кривая 1 на рис.7) и более, но и на угловой зоне рециркуляции (см. рис. 6). При дальнейшем уменьшении доли топлива в ПГ максимум тепловыделения смещается еще ближе к ГУ (кривые 3, 4, 5 рис. 7) и, судя по возросшему его абсолютному значению, именно угловая зона рециркуляции становится основной зоной стабилизации фронта пламени, а большая часть ТВС сгорает в ней вблизи горелки.

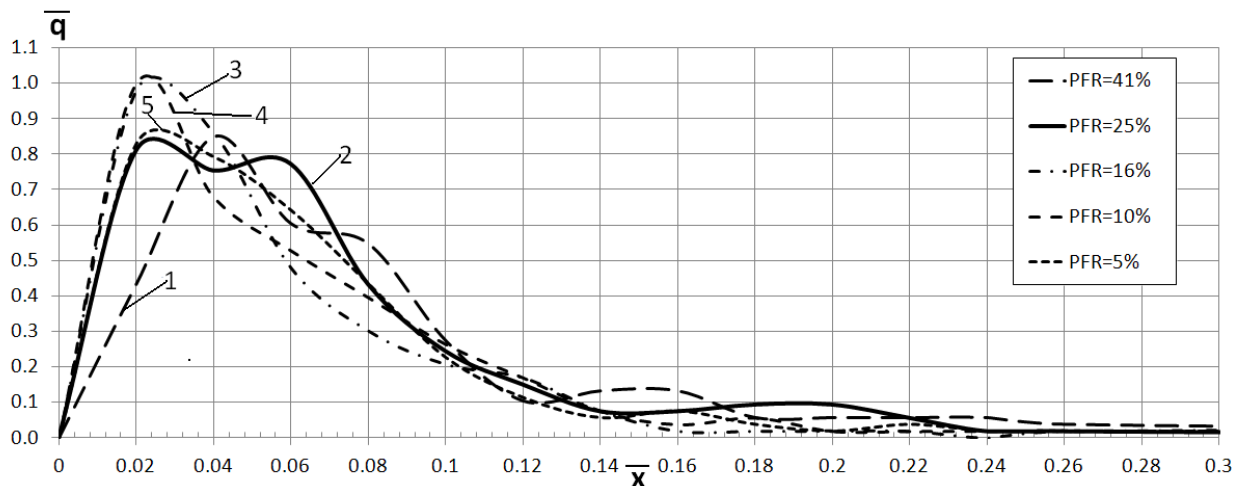


Рис. 7. Удельное тепловыделение по длине ЖТ: 1 - PFR=41%; 2 - PFR=25%; 3 - PFR=16%; 4 - PFR=10%; 5 - PFR=5%

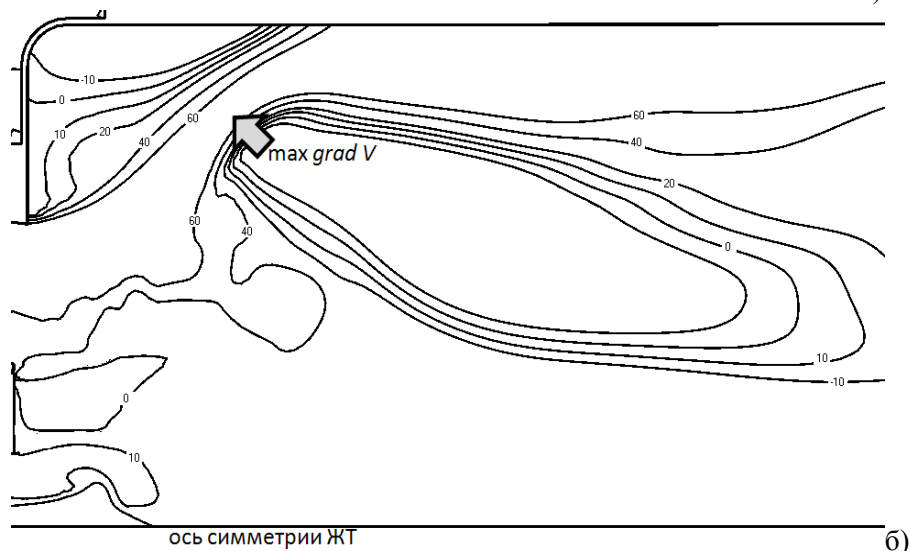
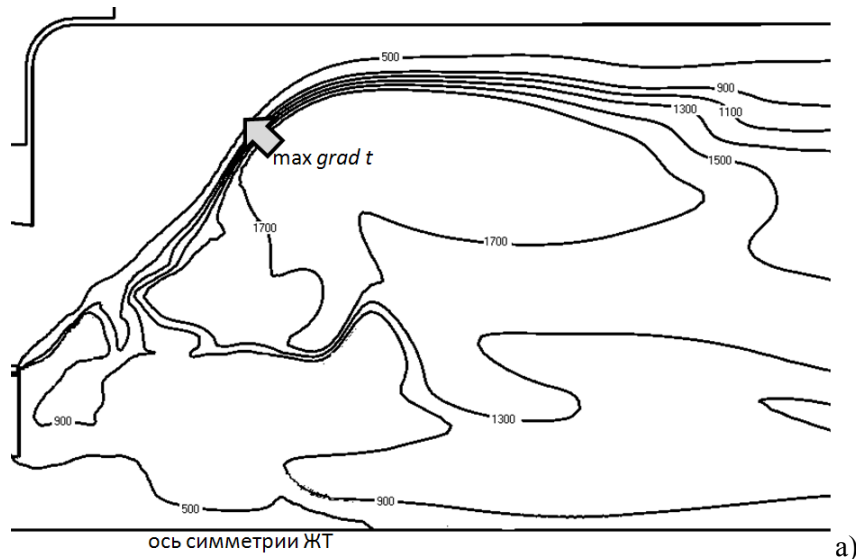
Режим, при котором наблюдается искажение фронта пламени и его стабилизация как на центральной, так и на угловой зонах рециркуляции, сопровождается пульсациями давления с амплитудами, превышающими 2% от давления воздуха на входе в МЭКС.

Проблема возникновения неустойчивого горения при сжигании хорошо перемешанных топливоздушных смесей хорошо известна и описана во многих российских и зарубежных источниках. Диагностировать возникновение неустойчивости на этапе проектирования и предварительных расчетов МЭКС сложно, поскольку требуется совместное решение нестационарных

задач акустики, гидродинамики и горения. Расчеты нестационарного течения и горения требуют значительных ресурсов и экспериментального подтверждения, поэтому важна разработка физически понятных критериев, связывающих устойчивость горения со стационарными параметрами процесса в КС. Такой критерий был предложен в [4] для МЭКС подобного типа и применен в данной работе. В [4] выявлена связь между местоположением и величинами максимальных изменений скорости и температуры, оцененными по результатам расчетных исследований и наблюдаемыми пульсациями давления в камере сгорания, замеренными экспериментально. Расположение максимального градиента температуры  $\max grad(t)$  – можно трактовать, как расположение фронта пламени, так как именно на поверхности фронта пламени происходит максимальное изменение температуры на кратчайшем расстоянии. Было установлено, что местоположение и форма фронта пламени играют доминирующую роль в процессе устойчивого горения [4]. Вблизи ГУ гидродинамическая картина носит сложный характер, имеются зоны с большими локальными изменениями скорости от  $-10$  м/с до  $130$  м/с  $\max grad(V)$ , обусловленными конструкцией горелочного устройства (крутки потоков пилотной и основной горелок, рис. 6). Приближение фронта пламени к этим зонам способствует возникновению неустойчивого горения в МЭКС.

Анализ режимов работы МЭКС показал, что изменение поля концентрации в объеме ЖТ, путем изменения распределения топлива между ПГ и ОГ, приводит к изменению местоположения и формы фронта пламени. При определенных значениях доли пилотного топлива ( $PFR=25\%$ , рис. 7, 6) происходит перемещение фронта пламени в область больших градиентов скорости, что приводит к неустойчивости процесса горения и возникновению пульсаций давления.

В данной работе применена идея, заложенная в [4], но доработанная под изменившиеся режимы горения. В [4] рассматриваются режимы горения только ТВС без поддержки пилотным топливом. Критерий устойчивости оценивается в сечении максимального изменения скорости по радиусу ЖТ. Такая оценка является частным случаем и может применяться при условии не сильного искажения фронта пламени, приближающегося к плоскому. В данном случае, за счет горения топлива ПГ фронт пламени сильно искажен. Существует два источника тепловыделения - в центральной зоне рециркуляции и в угловой. Для сложного, искаженного фронта пламени критерий устойчивости был доработан и откоррелирован по экспериментальным данным.



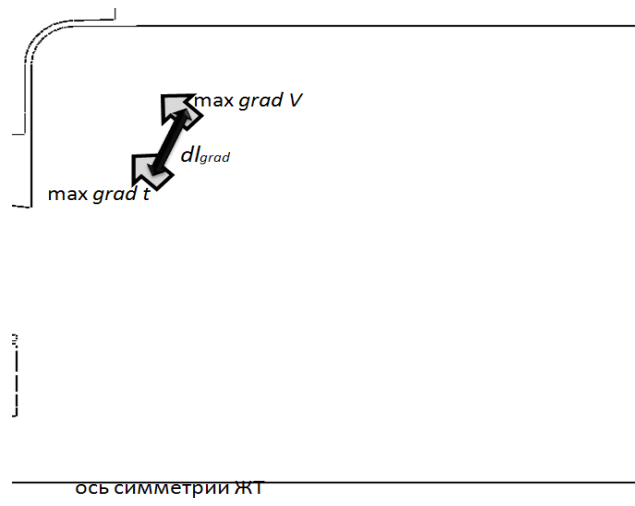


Рис. 8. Продольное сечение ЖТ: а - изолинии температуры с указанием места максимального градиента по температуре; б - изолинии осевой скорости с указанием места максимального градиента скорости; в - взаимное расположение максимальных градиентов температуры и скорости с указанием кратчайшего расстояния между ними

В предложенном критерии устойчивости горения учтено взаимное расположение максимумов изменений температуры -  $\max grad(t) = \max \frac{dt}{dl}$  (см. рис. 8а) и изменений осевой скорости -  $\max grad(V) = \frac{dV}{dl}$  (см. рис. 8б).

Критерий устойчивости формулируется как

$$\frac{\max grad(t) * \max grad(V)}{dl_{grad}},$$

где  $dl_{grad}$  - кратчайшее расстояние между максимумами градиентов (см. рис. 8 в).

Расчетная величина устойчивости хорошо коррелируется с экспериментально измеренными амплитудами пульсаций давления. Результаты экспериментальных и расчетных исследований приведены в таблице 12.

Таблица 1 Результаты расчетных и экспериментальных исследований

Доля топлива в ПГ, PFR, %	Амплитуда пульсаций (эксперим), A', %	$\frac{\max grad(t) * \max grad(V)}{dl_{grad}} * 10^{-11}$ (расчет)	$\max grad(t)$	$\max grad(V)$	$dl_{grad}$
41	0.019	0.089	238744	5083	0.15
25	0.77	50.09	148592	12463	0.000364
16	0.14	10.7	195250	13474	0.00245
10	0.054	1.02	166370	12548	0.0204
5	0.056	0.0207	198947	5222	0.0501

На рисунке 9 показана зависимость амплитуды пульсаций давления от доли топлива в ПГ, снятая экспериментально на режиме  $P_{вх}=330$  кПа,  $t_{вх}=340$  С,  $\alpha = 3.37$ . Максимум пульсаций давления наблюдается при доле топлива в ПГ 25%.

На рисунке 10 показана зависимость замеренной амплитуды пульсаций давления от расчетного параметра устойчивости  $\frac{\max grad(t) * \max grad(V)}{dl_{grad}}$ . Видно, что данные величины хорошо коррелируются.

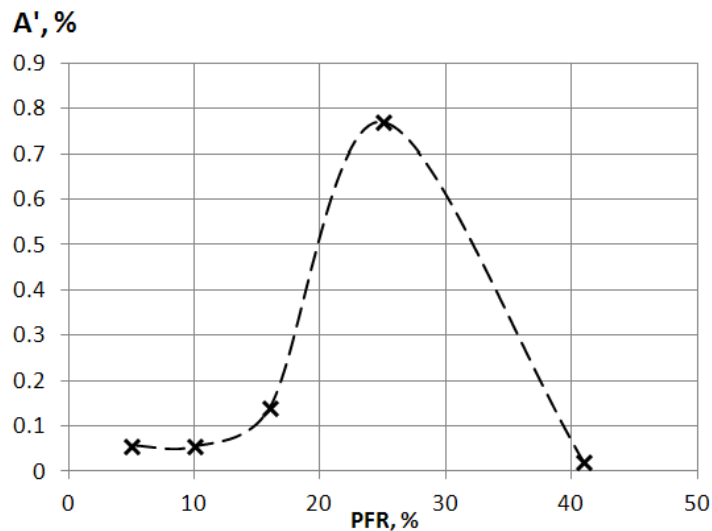


Рис. 9. Зависимость амплитуду пульсаций давления от доли топлива в ПГ  
 $P_{вх}=330$  кПа,  $t_{вх}=340$  С,  $\alpha=3.3$

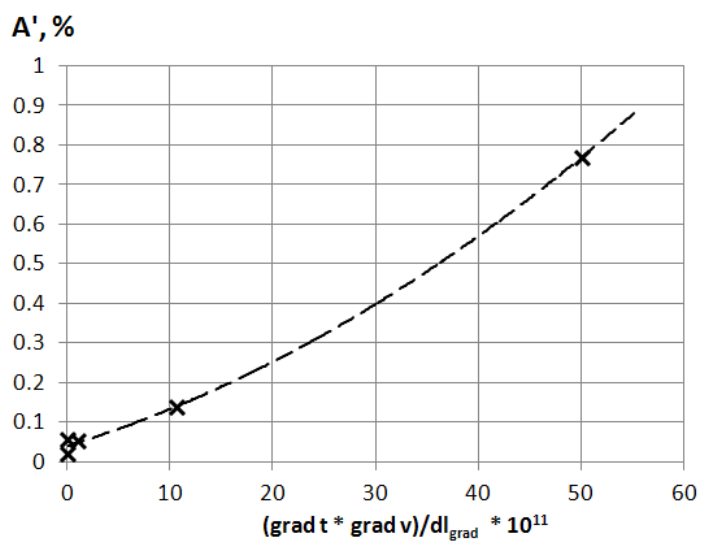


Рис. 10. Зависимость замеренной амплитуды пульсаций давления от расчетного параметра устойчивости

### Вывод/Заключение

- ✓ Полученные зависимости позволяют на основе численного моделирования процесса образования ТВС в малоэмиссионных камерах сгорания, работающих по принципу предварительного перемешивания топлива и воздуха при работе КС без поддержки пилотным топливом оценивать эмиссии оксидов азота. С ростом давления воздуха на входе эмиссии  $NO_x$  в зависимости от качества ТВС возрастают не одинаково. В диапазоне давлений 120 - 450 кПа получены зависимости, позволяющие оценить влияние давления на рост образования эмиссий  $NO_x$  при разном качестве ТВС.
- ✓ Полученные результаты подтверждают правомерность использования расчетного критерия устойчивости для определения границы устойчивой работы МЭКС при переходе на малоэмиссионный режим горения.
- ✓ Представленные результаты имеют практическое значение и позволяют сократить затраты на экспериментальные исследования МЭКС при ее разработке и доводке.

### Список литературы

1. Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Харченко С. А. и др. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision — М.: Вычислительные методы и программирование, т.11, 2010.
2. Булысова Л.А., Васильев В.Д., Берне А.Л. Методика обработки экспериментальных данных неустойчивости горения — М.: Энергетик. — 2014. — № 1, стр. 55-59.
3. Булысова Л.А., Васильев В.Д. Численные исследования процесса тепловыделения в малоэмиссионной камере сгорания — М.: Энергетик. — 2012.— № 9, стр. 29-36.
4. Булысова Л.А., Горбань В.Н. Влияние перемешивания топлива и воздуха на процесс горения в малоэмиссионной камере сгорания — М.: Теплоэнергетика. — 2013. — № 9, стр. 15-20.