

УДК 621.438

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОТОКСИЧНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ГТД

© 2011 А. Н. Маркушин¹, В. К. Меркушин¹, А. В. Бакланов²¹ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»² Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева (КАИ)

Представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых на базовой и модернизированной камерах сгорания серийной газотурбинной установки. Конструкция новой камеры позволила снизить концентрацию выбросов токсичных веществ по сравнению с серийным вариантом.

Камера сгорания, оксид азота, окислы углерода, токсичность, эксперимент, экология.

Современный период развития двигателестроения характеризуется процессом конвертирования авиационных газотурбинных двигателей в наземные установки, топливом в которых служит природный газ. Улучшение экологических характеристик стало в последние годы одним из основных направлений развития и совершенствования газотурбинных двигателей, наиболее широко используемых в качестве привода нагнетателей природного газа на магистральных газопроводах.

В настоящее время существует ряд направлений низкоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания ГТД, где организация рабочего процесса осуществлена по схеме "DLE" — Dry Low Emission (дословно: сухая низкая эмиссия), когда получение низкого уровня вредных выбросов достигается «сухим» методом, то есть без добавления воды, пара или аммиака в проточную часть камеры сгорания. К таким направлениям относятся [1]:

1. Концепция RQL (Rich - Quench-Lean), которая основана на низкотемпературном сжигании богатой топливовоздушной смеси (ТВС) с подачей всего топлива в первую зону горения, быстром смешении с оставшимся воздухом и дожиганием бедной ТВС при низкой температуре во второй зоне камер сгорания.

2. Концепция LPP (Lean - premixed and prevaporized), которая основана на низкотемпературном ($T_{пл} \leq 1800...1900$ К)

сжигании предварительно перемешанной «бедной» топливовоздушной смеси.

Однако наряду с перечисленными выше концепциями имеет место, и до сих пор остаётся актуальным модернизация конструкции традиционных камер сгорания, которая включает в себя определённые преимущества, такие, как: простота, надёжность, десятилетиями отработанная технология проектирования, изготовления и эксплуатации, одноконтурная система подачи топлива и однозначность управления на основных режимах.

Ряд предприятий авиадвигательной отрасли и в настоящее время ведут работы по модернизации конструкции камер сгорания (КС) традиционных схем в целях улучшения экологических показателей стационарных ГТД. В СНТК им. Н.Д. Кузнецова (г. Самара) был проведён большой комплекс работ по оптимизации конструкции традиционной камеры сгорания высокоэффективного ГТУ НК-36СТ [2]. В ОАО КПП «Авиамотор» (г. Казань) велись работы по снижению токсичных веществ путём перераспределения отверстий по длине жаровой трубы двигателя НК-18СТ [3]. В ФГУП «НПП Мотор» (г. Уфа) модернизировали камеру сгорания двигателя Р13-300, используемого в качестве газотурбинного привода энергетической установки ГТЭ-10/95 [4]. Метод локального дозирования вдува воздуха в высокотемпературные зо-

ны камеры сгорания успешно внедрен фирмой «ЭСТ» (С.-Петербург) для экологической модернизации установок ГТК-10, ГТК-760-6, KWV VR-438, MS-3002 [5]. В ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» также проводились стендовые исследования модификаций авиационной камеры сгорания для ГТД наземного применения [6].

На ОАО «КМПО» также ведутся работы по усовершенствованию конструкции традиционных КС в целях снижения выбросов токсичных веществ. В камере сгорания двигателя НК-16СТ роль фронтального устройства выполняют тридцать две вихревые горелки с индивидуальным подводом топливного газа, равномерно расположенные по окружности в кольцевой головке на входе жаровой трубы (рис. 1).

Применение горелок такого типа позволило сократить зону горения, а следовательно, и площадь поверхности жаровой трубы, требующей интенсивного охлаждения. В камерах сгорания двигателей НК-16СТ, в зоне смешения расположены смесительные патрубки, которые служат для подвода большого количества охлаждающего воздуха в эту зону. Патрубки внутреннего и наружного кожухов жаровой трубы расположены в шахматном порядке друг относительно друга, такое их расположение способствует более полному перемешиванию горячих газов с «холодным» «вторичным» воздухом. Кроме того, на выходе камеры сгорания требуется не только понизить температуру в ядре потока до уровня, приемлемого материалами турбины, но и сформировать эпюру температур оптимальной неравномерности, чтобы создать выгодные для лопаток турбины условия работы.

В настоящее время известны общепринятые рекомендации по снижению оксидов азота в традиционной камере сгорания ГТД, такие, как:

- снижение температуры газа в зоне горения;

- сокращение времени пребывания t_{np} продуктов сгорания в КС;

- предварительное смешение топлива с воздухом;

- «обеднение» топливовоздушной смеси и интенсификация смешения топлива и воздуха в первичной зоне.

Что касается окиси углерода, то согласно работе [7] она образуется как промежуточное вещество в процессе окисления углеродосодержащих топлив, а борьба с выбросами СО сводится не к предотвращению образования этого вещества, а к проблеме завершения реакции его окисления. Поэтому в камерах сгорания ГТД необходимо обеспечить оптимальные условия для процесса догорания СО, такие, как: длина камеры, подвод вторичного воздуха, зона обратных токов и интенсивность смешения.

На основании приведенных выше рекомендаций, была модернизирована конструкция серийной камеры двигателя НК-16СТ в целях улучшения эмиссионных характеристик ГТУ.

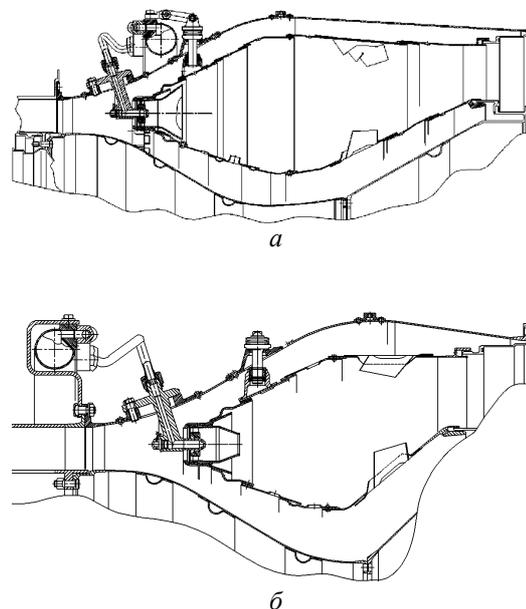


Рис.1. Конструктивная схема серийной (а) и модернизированной (б) камер сгорания ГТД НК-16 СТ

Можно выделить основные конструктивные особенности, которые отличают серийную камеру от модернизированной (рис. 1):

- 1) габариты камеры;
- 2) распределение отверстий по длине жаровой трубы;
- 3) форма насадка горелочного устройства.

Сокращение габаритов камеры связано со снижением времени пребывания t_{np} продуктов сгорания в КС, так как оно напрямую влияет на уменьшение образования оксидов азота. Жаровая труба была сокращена с 0,575 до 0,347м, вследствие чего t_{np} уменьшилось с 11 в серийной КС до 7 мс в модернизированной камере.

При этом параметр объёмной теплонапряжённости $Q_v = \frac{G_T \cdot H_u \cdot h_T}{V_{ж} \cdot P_K^*}$ укороченной камеры укладывается в диапазон, рекомендованный для современных камер сгорания ГТД [7]: $Q_v = (1,2 \div 6,5) \cdot 10^6$ Дж/ч·м³ Па. Для серийной КС Q_v составляет 0,95, а для укороченной 1,8·10⁶ Дж/ч·м³ Па.

Влияние t_{np} на образование NO_x, в зависимости от состава смеси представлено на рис.2, где наблюдается существенное снижение уровня выбросов оксида азота в камере с меньшим временем пребывания газа. Данные получены на автономном стенде, предназначенном для гидравлических и огневых испытаний камер сгорания.

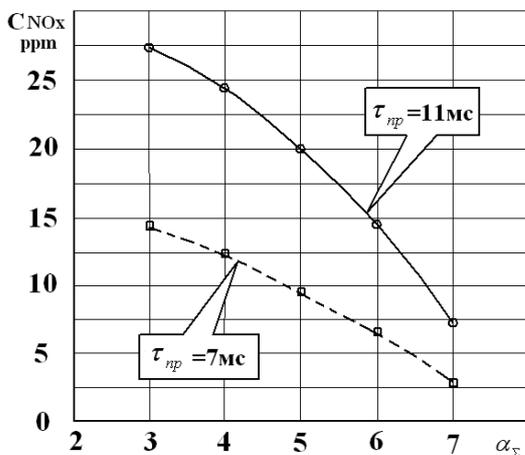


Рис.2. Влияние t_{np} на образование NO_x при различных α , $T_K^* = 500$ K, $P_K^* = 0,1$ МПа

Наряду с сокращением жаровой трубы в зону горения модернизированной КС подведено большее количество воздуха по сравнению с серийной камерой (рис.3.), что осуществлялось за счёт уменьшения проходных сечений патрубков смесителей, расположенных в зоне смешения, и организации дополнительного ряда отверстий в зоне горения. Дополнительная масса воздуха способствовала уменьшению уровня температур в зоне горения, что также повлияло на снижение выхода NO_x, так как большая их часть формируется в зоне высоких температур. Кроме того, была обеспечена большая площадь проходного сечения на входе в горелочное устройство, что на ~15% больше, чем в исходном серийном варианте.

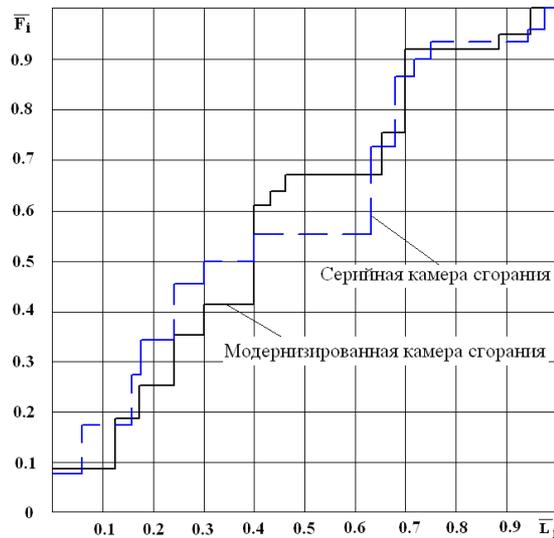


Рис.3. Распределение относительных площадей отверстий по относительной длине серийной и модернизированной КС

Значительный вклад на время пребывания горячих газов в КС вносит форма насадка горелочного устройства. Исследования, проведенные в работе [8], показали, что при равных коэффициентах избытка воздуха время пребывания продуктов сгорания за горелочным устройством с диффузорной формой насадка несколько больше, чем за конфузорной. Отчасти этим объясняется выбор данной конструкции горелочного устройства в модернизированной КС.

Исследования двух видов КС осуществлялись на автономном стенде, который обеспечивает в камере на режимах испытаний параметры воздуха, газа и топлива, требуемые техническими условиями: температура воздуха на входе в мерный участок стенда $t_{\text{вх}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость воздуха $C_{\text{вх}} = 115 \text{ м/с}$, средний коэффициент избытка воздуха в КС $\alpha_{\Sigma} = 5$.

Во время испытаний КС в составе стендовой установки производилась оценка и измерение пусковых, «срывных», эмиссионных характеристик, полноты сгорания топлива и контроль неравномерности поля температуры на выходе из камеры.

На рис.4. представлена зависимость коэффициента избытка воздуха α_{Σ} , который соответствует срыву пламени от скорости воздуха на входе в камеру. В модернизированной КС отмечается ухудшение устойчивости горения относительно «бедного» срыва пламени, что связано с подачей большего количества воздуха в зону горения по сравнению с серийным вариантом.

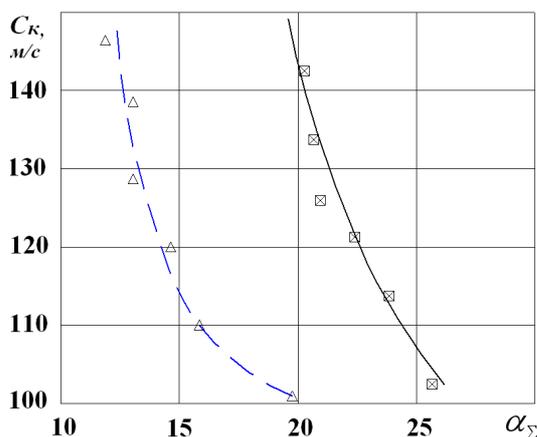


Рис.4. Характеристики «бедного» срыва пламени КС: \square - серийная КС; Δ - модернизированная КС

В результате проведённых измерений также были получены полнотные характеристики, которые отражают зависимость коэффициента полноты сгорания η_{Γ}

от общего коэффициента избытка воздуха α (рис. 5).

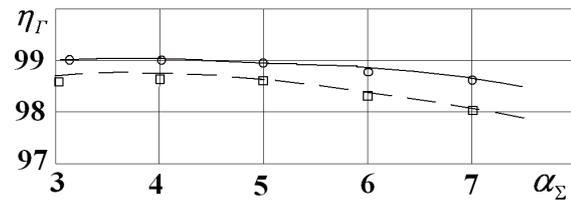


Рис.5. Характеристики полноты сгорания топлива на выходе из КС:

\square - серийная КС; \circ - модернизированная КС

Наиболее эффективными конструктивными параметрами, влияющими на полноту сгорания, являются параметры головочной части жаровой трубы: степень раскрытия фронтального устройства, которая характеризуется отношением площадей $F_{\text{фр}}$ к площадям всех отверстий $\bar{F}_{\text{фр}} = \frac{F_{\text{фр}}}{F_{\Sigma}}$, угол установки лопаток, направление крутки завихрителей, размеры и расположение первого ряда отверстий.

Результаты многих экспериментов подтвердили, что определяющим фактором h_{Γ} является состав смеси в первичной зоне, где обеднение последнего приводит к снижению полноты сгорания.

Как было отмечено выше, во фронтальном устройстве модернизированной камеры вместо серийных диффузорных горелок, недостатком которых является низкое значение градиента скорости в радиальном направлении на всей длине зоны рециркуляции потока, установлены конфузорные горелки. В этом случае градиент поперечной скорости максимален, что обеспечивает полное выгорание топлива на малой длине.

Полученные данные позволили сделать вывод, что изменением конструкции горелочного устройства при одинаковых параметрах закрутки потока возможно влиять не только на время пребывания продуктов сгорания, но и на полноту сгорания топлива в КС.

На рис. 6 приведены неравномерности поля температуры на выходе из се-

рийной и модернизированной камер. Видно, что в районе термопары №4 модернизированной камеры наблюдается некоторое увеличение температуры по сравнению с серийным вариантом. Это позволяет считать, что конфузурная форма насадка в горелочном устройстве формирует более горячее ядро потока. Полученные величины неравномерности температурного поля серийной и модернизированной камер соответствуют нормам ТУ. Однако необходимо отметить, что понадобилась индивидуальная доводка модернизированной камеры по обеспечению окружающей неравномерности температурного поля.

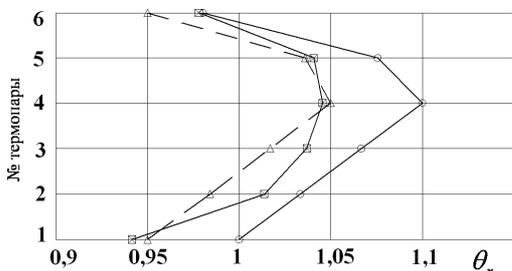


Рис.6. Температурное поле на выходе из КС
 □ - серийная КС; Δ - модернизированная КС;
 ○ - норма по ТУ

Следующий этап работ по исследованию КС был проведён в составе полноразмерного двигателя НК-16СТД: отработаны запуск, выход на различные режимы

мощности, в шахте выхлопа замерена концентрация выбросов токсичных веществ, замерены пульсации давления за компрессором и в камере сгорания.

Таблица 1. Концентрация CO и NO_x для двух вариантов КС и норма по ГОСТ

Тип камеры сгорания	Нормированный уровень выбросов, мг/нм ³ (приведённый к 15% O ₂)	
	CO	NO _x
Серийная	270	147
Модернизированная	250	96
Норма по ГОСТ 28775-90	300	150

Данные по уровню концентрации CO и NO_x на максимальном режиме работы Ne=16 МВт для серийной и модернизированной камер представлены в таблице 1. Видно, что в модернизированной КС на максимальном режиме выбросы, приведенные к концентрации кислорода 15%, составили NO_x = 96 мг / м³, CO = 250 мг / м³, что ниже показателей серийной камеры и удовлетворяют современным экологическим требованиям. Поэтому модернизированную КС можно считать малотоксичной.

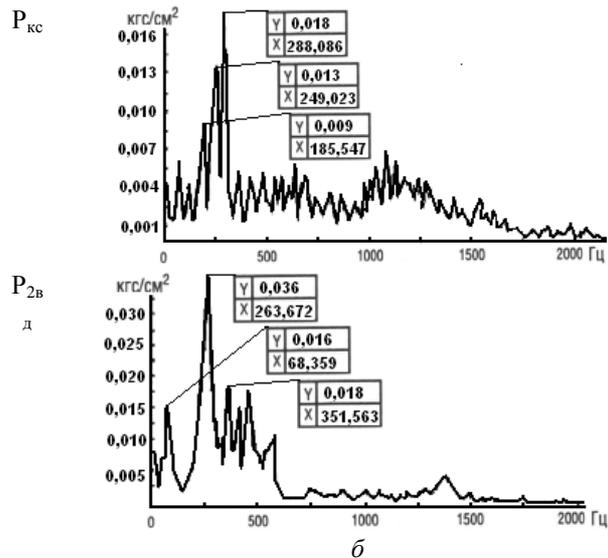
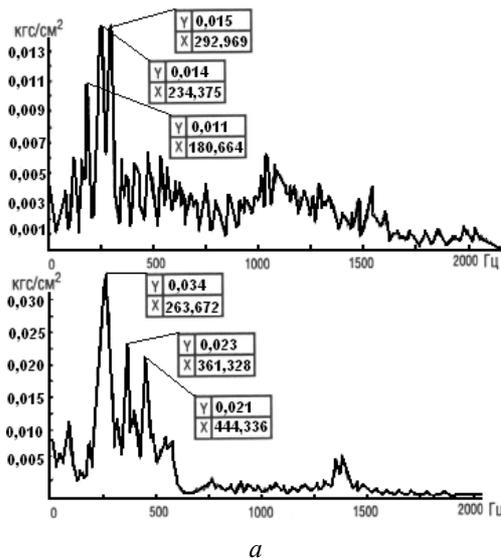


Рис.7. Графики замера пульсаций давления за компрессором ВД и в камере сгорания двигателя с низкоэмиссионной (а) и серийной (б) КС

Графики замера пульсаций давления за компрессором и в камере сгорания при работе двигателя НК-16СТ на максимальном режиме показаны на рис.7. Абсолютный уровень пульсаций давления при работе двигателя на максимальном режиме не превышал 0,15% от уровня давления за компрессором, на остальных режимах был в пределах 0,7%.

Сравнение уровней пульсаций давления за компрессором и в камере сгорания двигателя с серийной и малоэмиссионной камерами показывает, что они находятся в одном диапазоне. Полученные уровни пульсаций давления существенно ниже 1% от среднего давления в сечении, принятого за критерий допуска.

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы.

1. Спроектирована и испытана камера сгорания, выполненная по традиционной схеме. Внедрение и установка камеры потребовали минимального изменения конструкции, она полностью собрана из узлов серийной КС.

2. Модернизированная камера сгорания имеет приемлемые показатели по всем основным характеристикам и удовлетворяет нормам ТУ, предъявляемым к серийной КС.

3. Реализован действенный способ снижения выбросов токсичных веществ, осуществлённый посредством модернизации конструкции традиционной камеры сгорания.

4. Отсутствие замечаний по состоянию камеры сгорания после испытаний, наличие удовлетворительного значения объёмной теплонапряженности и аналогичный характер пульсаций давления в малоэмиссионной и серийной камерах позволяют считать, что ресурсные показатели обеих камер сгорания идентичны.

Библиографический список

1. Постников, А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ [Текст]/ А. М. Постников.- Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН. - 2002. - 286 с.

2. Маркушин, А. Н. Опыт отработки камер сгорания традиционных схем для высокоэффективных ГТУ [Текст]/ А. Н. Маркушин, А. М. Постников, В. П. Савченко // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып.1. - Самара, 1998. С.257-263.

3. Мингазов, Б. Г. Оптимизация основных характеристик камеры сгорания ГТД путём перераспределения «вторичного» воздуха по длине жаровой трубы [Текст]/ Б. Г. Мингазов, А. Н. Королёв, В. К. Меркушин, В. В. Стародубцев, Р. М. Низамутдинов // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып.4. - Самара, 2002. - С.103-108.

4. Ивах, А. Ф. Особенности конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе [Текст]/ А.Ф. Ивах, Г.П. Гребенюк, М.Н. Ишбулатов, В.И. Арефин, Н.И. Фокин // Вестник СГАУ. №2(2). - Самара, 2002. - С.21-26.

5. Сударев, А. В. Экологическая модернизация ГПА и компрессорных станций Рургаза [Текст]/ А.В. Сударев, Е.Д. Виноградов, Ю.И. Захаров // Вестник СГАУ Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып.3. - Самара, 2000. - С.266-278.

6. Волков, С.А. Исследование модификаций авиационной камеры сгорания для ГТД наземного применения [Текст]/ С.А. Волков // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып.3. - Самара, 2000. - С.20-24.

7. Мингазов, Б. Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст]/ Б.Г. Мингазов.- Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. -220 с.

8. Ланский, А. М. Исследование процесса горения природного газа в камерах сгорания авиационного ГТД [Текст]/ А.М. Ланский // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып. 1. - Самара, 1998. - С.228-240.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A LOW-TOXIC COMBUSTION CHAMBER OF A STATIONARY GTE

© 2011 A. N. Markushin¹, V. K. Merkushin¹, A. V. Baklanov²

¹Joint-Stock Company «Kazan motor production association»

²Kazan State Technical University

The results of experimental studies carried out on the basis of a conventional and modernized combustion chambers for a full-scale gas turbine plant are presented. The concentration of toxic substance emissions is reduced as compared with a serial combustion chamber.

Combustion chamber, nitric oxide, toxicity, experiment, ecology.

Информация об авторах

Маркушин Андрей Николаевич, главный конструктор, Казанское моторостроительное производственное объединение. E-mail: AMarkushin@kmpo.ru. Область научных интересов: разработка и производство газотурбинных двигателей.

Меркушин Валентин Константинович, ведущий инженер–конструктор отдела главного конструктора, Казанское моторостроительное производственное объединение. E-mail: AMarkushin@kmpo.ru. Область научных интересов: проектирование камер сгорания ГТД.

Бакланов Андрей Владимирович, аспирант, Казанский государственный технический университет. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Область научных интересов: горение в турбулентном потоке, моделирование, исследование.

Markushin Andrey Nikolaevich, The main designer of Joint-Stock Company «Kazan motor production association». E-mail: AMarkushin@kmpo.ru. Area of research: development and manufacture of gas turbine engines.

Merkushin Valentin Konstantinovich, Leading engineer-designer of the Department of the main designer Joint-Stock Company «Kazan motor production association». E-mail: AMarkushin@kmpo.ru. Area of research: Designing of combustion chambers of GTE.

Baklanov Andrey Vladimirovich, Post-graduate student of Kazan State Technical University. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Area of research: Burning in a turbulent stream, modelling.