

# Экспериментальное и численное исследование ускорения водородно-воздушного пламени в большом ограниченном объеме с отводом тепла

В. В. Володин<sup>1</sup>, А. И. Гавриков<sup>1,2</sup>, В. В. Голуб<sup>1</sup>, А. Ю. Микушкин<sup>1,3</sup> и В. А. Петухов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва 123182, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, Москва 105005, Россия

E-mail: golub@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2018 г.

**Аннотация.** В статье представлено экспериментальное и численное исследование распространения водородно-воздушного пламени в адиабатических условиях и с отводом тепла. Результаты экспериментов в цилиндрической оболочке объемом 4.5 м<sup>3</sup> сравниваются с результатами численного моделирования. Получено качественное соответствие экспериментальных и численных результатов. Показано, что отвод части тепла, выделяемого при сгорании, может значительно снизить скорость распространения пламени. <https://doi.org/10.33849/2019110>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

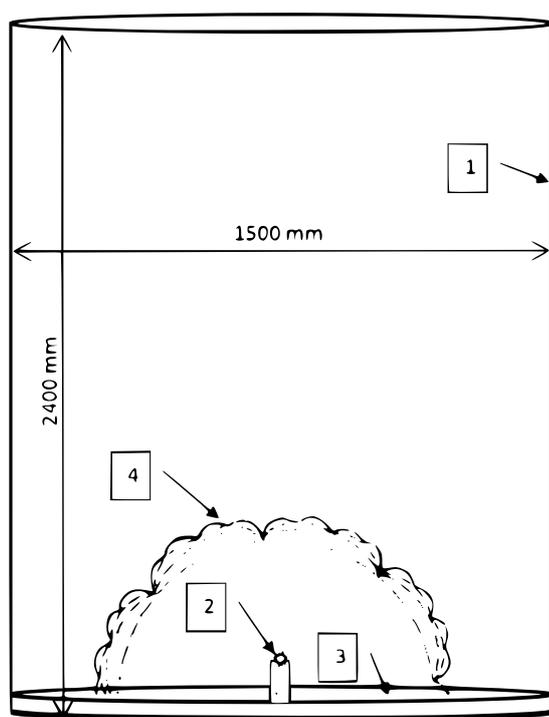
Задача распространения и ускорения пламени в газовых смесях вызывает интерес как в фундаментальной науке, в связи со сложным характером взаимодействия химии, термодинамики и гидродинамики процесса, так и в прикладной части, в вопросах энергетического сжигания и обеспечения безопасности. Создание двигателей внутреннего сгорания и пульсирующих детонационных устройств связано с проблемой инициирования и развития горения [1, 2]. В пульсирующих детонационных устройствах требуется на коротком участке ускорить пламя и сформировать детонационную волну, в двигателях внутреннего сгорания необходимо обеспечить скорость горения в определенных пределах. Превышение этой скорости приводит к избыточным нагрузкам и разрушению двигателя. Низкая скорость горения снижает полноту сгорания топлива и коэффициент полезного действия. В задачах, связанных с безопасностью [3], требуется максимальное снижение скорости пламени для ослабления взрывных нагрузок и полноценной работы систем пожаротушения.

Гладкий фронт пламени в газовых смесях неустойчив. Ускорение фронта газового пламени на начальной стадии после инициирования вызвано искривлением его фронта [4] и гидродинамическим растяжением пламени [5]. Искривление фронта пламени вызвано его термодиффузионной [6] и гидродинамической [7, 8] неустойчивостью. Рост площади поверхности пламени [9] является необходимым условием ускорения фронта. Гидродинамическое растяжение обусловлено наличием стенок, изменяющих направление потока газа. При приближении фронта пламени к стенке объема возникают течения газа, параллельные фронту пламени. Данные течения увеличивают поверхность пламени и скорость потока горючей смеси вдоль стенок. Рост площади поверхности фронта пламени и гидродинамическое растяжение пламени увеличиваются с ростом степени расширения газа при сгорании [10]. Степень расширения рассчитывается как отношение плотности горючей смеси к

плотности продуктов сгорания и зависит исключительно от термодинамических характеристик процесса горения. Второй важной характеристикой фронта пламени, определяющей его неустойчивость и скорость горючей смеси перед ним, является нормальная скорость пламени. Она определяется химической кинетикой процесса горения, и отвод тепла из объема продуктов сгорания на нее влияет незначительно. Таким образом, можно считать, что потери тепла на стенках объема, в котором происходит сгорание, оказывают воздействие на распространение пламени через термодинамику процесса.

В настоящее время разрабатывается ряд кодов и моделей для описания различных режимов горения и соответствующего уровня взрывных нагрузок. Нынешний уровень понимания и компьютерные возможности не позволяют моделировать турбулентное горение в больших объемах из первых принципов. Упрощенные модели используются для описания как турбулентности, так и химии. Эти модели обычно включают несколько эмпирических констант, которые калибруются по экспериментальным данным. Кроме того, расчеты с существующими моделями турбулентного горения являются ресурсозатратными. Компьютерный код CREBCOM (CRiteria and Experimentally Based COMbustion) [11] был разработан для описания распространения пламени и взрывных нагрузок в больших объемах в условиях потерь тепла. Существует несколько кодов и моделей, которые включают учет потерь тепла, но большинство из них создано и адаптировано для моделирования двигателей внутреннего сгорания [12, 13]. Модифицированный код CREBCOM использует модель потерь тепла для моделирования горения в больших объемах.

Вопросы влияния потерь тепла в стенку [2] и недиффузионного переноса тепла в объеме реагентов [14] уже обсуждались в литературе. Данная работа посвящена исследованию ускорения пламени в водородно-воздушной смеси при интенсивном поглощении тепла одной из стенок объема. Помимо фундаментальной значимости задача имеет приложение в вопросах обеспечения пожаровзрывобезопасности объек-



**Рисунок 1.** Схема экспериментальной установки. 1 — оболочка, 2 — место иницирования горения, 3 — сплошная стенка или слой стальной шерсти, 4 — фронт пламени.

тов нефтехимии, атомной промышленности и атомной энергетики.

В настоящей работе модифицированный компьютерный код CREVCOM используется для моделирования экспериментов с высоким уровнем потерь тепла в слое стальной шерсти.

## 2. ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная часть исследования проводилась на установке (рисунок 1), состоящей из цилиндрической оболочки диаметром 1.5 м и высотой 2.4 м, изготовленной из полиэтилена высокой плотности (HDPE) толщиной 0.1 мм, ограниченной металлическим каркасом. Верх был закрыт тонкой (0.1 мм) резиновой оболочкой. Нижняя часть конструкции была закрыта сплошной алюминиевой пластиной. Для части экспериментов она была покрыта слоем стальной шерсти толщиной 50 мм. Установка была размещена внутри взрывной барокамеры ВБК-2, которая является частью Московского областного взрывного центра коллективного использования при Российской академии наук. Оболочка заполнялась водородно-воздушной смесью с содержанием водорода 15% при нормальном атмосферном давлении при температуре  $T \sim 293$  К. Процедура наполнения была следующая. Требуемое количество водорода ( $0.686 \text{ м}^3$ ) добавляли в оболочку, которая изначально была заполнена воздухом. Газ в оболочке перемешивался с помощью вентилятора диаметром 200 мм, обеспечивающим скорость потока 5 м/с. Перемешивание происходило в течение 1 часа, после чего вентилятор останавливался. Относительная погрешность состава смеси составляла 0.3%.

Через 0.5 часа после остановки вентилятора смесь зажигали путем взрыва тонкой нихромовой проволо-

ки диаметром 0.1 мм и длиной 10 мм, размещенной между двумя стальными электродами диаметром 4 мм в нижней части цилиндра. Во время зажигания смесь была неподвижной. Энергия, выделяемая на проволочке, составляла 5 Дж. Во всех экспериментах расстояние от точки воспламенения до поверхности составляло 100 мм и оставалось постоянным. Для регистрации последовательности положений и форм фронта пламени во времени использовалась инфракрасная камера InfraTec ImageIR 8320 со спектральным диапазоном 2.0–5.7  $\mu\text{м}$ . Вода, образующаяся при окислении водорода, излучает с характерным максимумом на длине волны 2.8  $\mu\text{м}$ . Таким образом, объект, захваченный ИК-камерой, является фронтом пламени.

Стальная шерсть, использованная в экспериментах, представляла собой конгломерат из волокон углеродистой стали прямоугольного сечения со средними размерами  $30 \mu\text{м} \times 5 \mu\text{м}$ . Средние значения: пористость — 98%, плотность —  $157 \text{ кг/м}^3$ .

## 3. ОПИСАНИЕ КОДА CREVCOM

### 3.1. Описание алгоритма расчёта

Компьютерный код CREVCOM (CRiteria and Experimentally Based COMbustion) использует полуэмпирический подход, основанный на определении характерных режимов горения по степени их опасности, и применении критериев для определения наиболее опасного из возможных режимов горения для конкретных начальных условий и геометрии. Далее в коде выбирается соответствующая трёхмерная модель горения, описывающая распространение пламени и нагрузки по давлению для выбранного режима горения: а) медленные пламена, б) быстрые пламена и в) детонация. Данный подход сочетает систему критериев и моделей горения в одну компьютерную среду, позволяющую производить консервативную оценку нагрузок, возникающих в процессе горения топливо-воздушной смеси. В данном случае термин «консерватизм расчётов» предполагает, что рассчитываемая в коде величина давления будет не меньше той, что получается в реальном эксперименте или аварийной ситуации. Система кодов CREVCOM была детально верифицирована для расчёта всех возможных режимов горения в водородно-воздушных смесях [11].

Код VOV, используемый в расчётах экспериментов со стальной шерстью, является частью системы кодов CREVCOM и используется для моделирования процессов медленного и быстрого горения. Модель горения, применяемая в коде, достаточно простая. Модель предполагает, что скорость горения зависит только от свойств смеси и не учитывает все аспекты сложного взаимодействия между гидродинамикой и скоростью выделения энергии в процессе горения.

Численная схема кода VOV использует трёхмерную явную схему первого порядка с разностями по потоку. Верификация гидродинамической части кода на аналитических задачах и экспериментальных данных показала его высокую точность и эффективность.

Код использует упрощённую термодинамическую модель, в которой уравнение состояния идеального газа применяется для смесей газов с постоянными теплоемкостями. Для термодинамических расчётов используется пакет CHEMKIN-II [15].

Модель горения, используемая в коде BOB, предполагает, что скорость горения в каждой счётной ячейке постоянна и воспламенение в следующей ячейке происходит, когда вещество в соседней счётной ячейке прогрело до некоторой степени  $\epsilon$ , задаваемой явно. Скорость горения определяется как  $\partial C/\partial t = K_0/x$ , где  $C$  — это массовая доля реагентов, а  $K_0$  — константа скорости горения и  $x$  — размер счётной ячейки.

### 3.2. Модель тепловых потерь

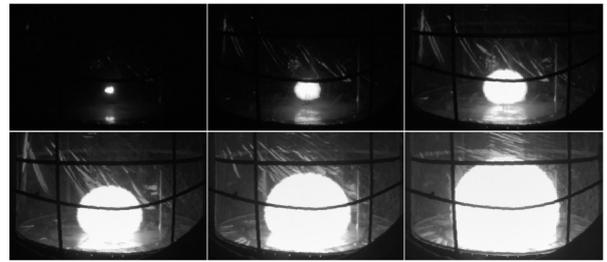
В коде используется модель горения с постоянной скоростью, которая зависит от состава смеси, но не меняется в процессе горения. Использование эффективной скорости горения, постоянной для данного состава смеси и начальных условий, но независимой от локальных условий движения потока, может рассматриваться как нулевое приближение реальной функции выделения/поглощения энергии. Постоянная скорость горения, вместе с использованием уравнений, не учитывающих тепловые потери, приводит к завышению скорости тепловыделения и полной энергии системы. Без модели тепловых потерь значения давления  $p(x, y, z, t)$  также завышаются в расчетах кодом BOB. Поэтому, учет тепловых потерь становится крайне важным, если мы хотим улучшить достоверность описания процесса горения и уменьшить консерватизм расчётов.

Начальные условия смеси: температура, давление и концентрация компонентов соответствовали экспериментальным. Из-за осевой симметрии экспериментальной установки была смоделирована четверть экспериментального объема. Вычислительная область за пределами экспериментального объема была расширена, чтобы избежать отражений от границ счётного объема. Нижняя, боковая и верхняя границы объема, были заданы как твердые стенки. Для адекватного моделирования вытеснения свежей смеси продуктами сгорания в направлении открытой верхней части канала, высота расчетного объема была увеличена в 2 раза по сравнению с экспериментальным.

Зависимость количества поглощенного слоем стальной шерсти тепла от времени рассчитывалась в двумерной постановке, исходя из экспериментально полученной зависимости радиуса фронта пламени от времени и рассчитанной теплопроводности стальной шерсти. Более подробно о методике расчета поглощения тепла изложено в [16]. Потери тепла на поглощающей стенке моделировались как потери энергии из каждой счётной ячейки, заполненной продуктами сгорания.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В каждом эксперименте были получены последовательности из нескольких десятков ИК фотографий распространяющегося пламени. Отдельные фотографии представлены на рисунке 2. Расстояние от точки инициирования до фронта пламени измерялось в вертикальном направлении, а также по горизонтали направо и налево. Измеренные расстояния отличались не более чем на 5%, характерный радиус рассчитывался как среднее арифметическое. Фотографии, представленные на рисунке 2, демонстрируют изначально сферическое, позднее близкое к полусферическому распространение пламени с возмущениями на фронте. Также



**Рисунок 2.** Последовательность ИК фотографий распространения фронта пламени над твердой плоской поверхностью в моменты времени 3.33, 16.67, 30, 43.33, 56.67 и 70 мс (слева направо сверху вниз).



**Рисунок 3.** ИК фотография фронта пламени над твердой плоской поверхностью в момент времени 100 мс.

видно, что во время распространения пламени в смеси с содержанием 15% водорода оболочка остается целой. Горючая смесь "выталкивается" расширяющимися продуктами сгорания в верхнюю часть цилиндрической оболочки, закрытую резиновой мембраной. Весь объем горючей смеси приобретает дополнительную осевую скорость, направленную от жесткой стенки, вблизи которой происходит инициирование пламени. При увеличении объема газа в оболочке, полиэтиленовые стенки деформируются мало, в то время как резиновая мембрана вытягивается, предотвращая разрыв оболочки. С этим связано вытягивание фронта пламени вдоль оси объема [5, 10] (рисунок 3). Экспериментальные зависимости положения фронта пламени от времени в случаях распространения пламени вдоль плоской алюминиевой стенки и слоя стальной шерсти представлены на рисунке 4.

Согласно [4], свободные сферические ламинарные пламена при слабом инициировании в отсутствие существенных внешних воздействий становятся нестабиль-

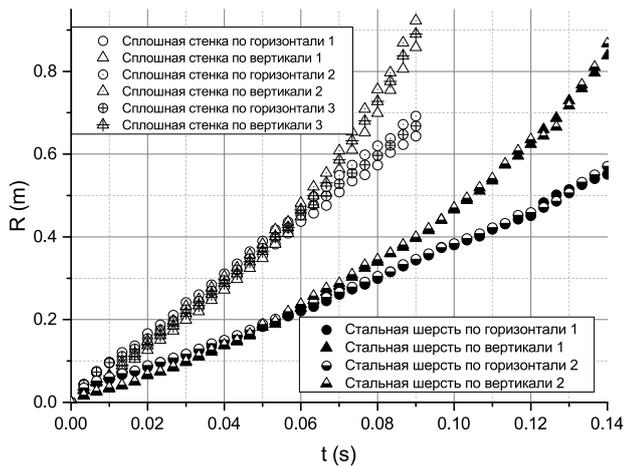


Рисунок 4. Графики радиуса фронта пламени от времени.

ными, турбулентными и самоускоряющимися при числах Рейнольдса  $10^3$ – $10^5$ . В соответствии с [17] число Пекле ( $Pe = vR/\chi$ , где  $R$  — радиус фронта пламени,  $v$  — скорость фронта пламени,  $\chi$  — температуропроводность исходной смеси) должно превышать критическое значение  $Pe \sim 100$  для ускорения фронта пламени. В описываемых экспериментах число Пекле достигало критического значения при радиусе фронта пламени менее 10 мм, следовательно, в течение всего времени наблюдения пламя ускоряется. При этом над слоем стальной шерсти пламя движется медленнее как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Вертикально распространяющийся фронт пламени достигает расстояния 0.8 м через 85 мс без стальной шерсти и через 135 мс при распространении над слоем стальной шерсти. Горизонтально распространяющийся фронт пламени достигает расстояния 0.5 м через 65 мс без стальной шерсти и через 130 мс — над слоем стальной шерсти.

Расчеты проводились на сетке  $100 \times 100 \times 250$  ячеек с ячейками кубической формы. Линейный размер ячейки составлял 10 мм и не менялся в процессе счета. Общее число ячеек в расчетах составляло 2 500 000.

Результаты численного моделирования эксперимента показаны на рисунках 5–7. На рисунке 5 представлены поля скорости потока в момент времени 101.5 мс над слоем стальной шерсти. Видна характерная вытянутая форма пламени, названная в работах [5, 10] "finger flame". Аналогичная структура течения наблюдается в эксперименте (рисунок 3). На рисунке 6 представлена последовательность расчетных полей концентраций реагентов над твердой плоской поверхностью с шагом времени 13.33 мс. R-t-диаграмма, показанная на рисунке 7, демонстрирует положение пламени в зависимости от времени от момента зажигания в двух направлениях. Как видно из рисунка 7, численное моделирование в адиабатическом случае дает завышенные размеры фронта пламени в горизонтальном и вертикальном направлениях на начальной стадии процесса горения. В случае распространения пламени с отводом тепла численные результаты совпадают с экспериментальными.

## 5. ВЫВОДЫ

Получены экспериментальные данные по полусферическому распространению пламени в водородно-

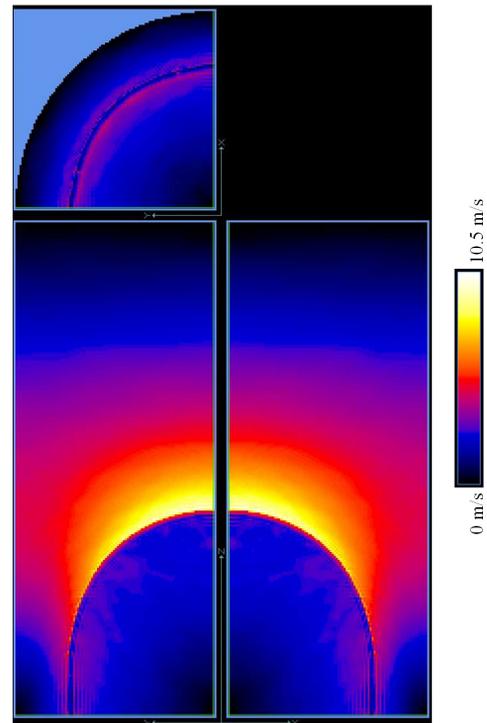


Рисунок 5. Поле скоростей в момент времени  $t=101.5$  мс. Представлены сечения расчетного объема в плоскостях XZ, XY и YZ.

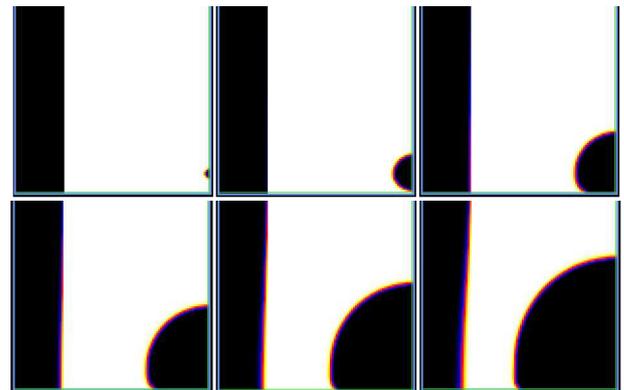
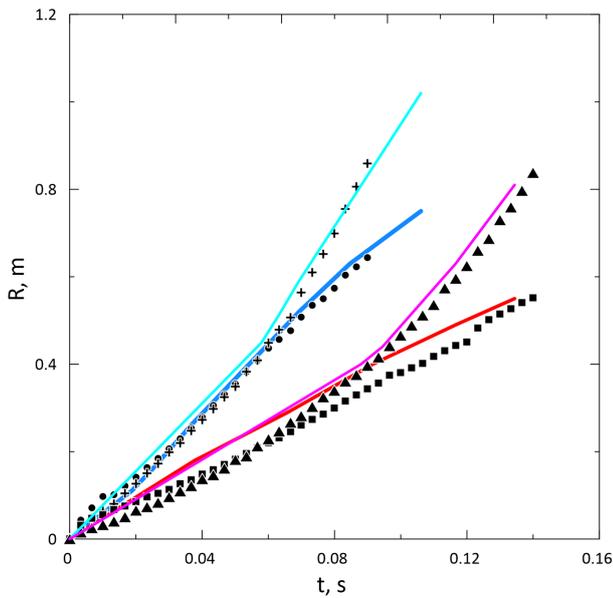


Рисунок 6. Последовательность расчетных полей концентраций реагентов над твердой плоской поверхностью в моменты времени 3.33, 16.67, 30, 43.33, 56.67 и 70 мс (слева направо сверху вниз).

воздушной смеси с содержанием водорода 15% при иницировании горения энергией 5 Дж.

Обнаружено, что при полусферическом распространении фронта пламени над слоем стальной шерсти время достижения пламенем размеров 0.8 м по вертикали и 0.5 м по горизонтали приблизительно в 2 раза выше, чем при распространении над твердой алюминиевой стенкой.

Численное моделирование с использованием кода CREVCOM, разработанного для расчета крупномасштабных взрывов с потерями тепла из области продуктов сгорания, показало соответствие расчетов с экспериментальными результатами.



**Рисунок 7.** Зависимости положения фронта пламени в горизонтальном и вертикальном направлении от времени. Результаты расчётов и экспериментов. Красные символы — результаты расчёта с высокими тепловыми потерями. Синие символы — результаты расчёта без тепловых потерь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasil'ev A A 2013 *J. Combust.* 945161
2. Kats G and Greenberg J B 2016 *J. Combust.* 1069873

3. Бесчастнов М В 1991 *Промышленные Взрывы: Оценка и Предупреждение* (Москва: Химия)
4. Гостинцев Ю А, Истратов А Г и Шулеин Ю В 1988 *ФГВ* **24** 63–69
5. Clanet C and Searby G 1996 *Combust. Flame* **105** 225–238
6. Баренблатт Г И, Зельдович Я Б и Истратов А Г 1962 *ПМТФ* **4** 21–26
7. Ландау Л Д 1944 *ЖЭТФ* **14** 240–249
8. Истратов А Г и Либрович В Б 1966 *ПМТФ* **1** 67–78
9. Prasad R O S and Gore J P 1999 *Combust. Flame* **116** 1–14
10. Demir S, Bychkov V, Chalagalla S H R and Akkerman V 2017 *Combust. Theor. Modell.* **21** 997–1023
11. Efimenko A A and Dorofeev S B 2001 *J. Loss Prevent. Proc. Industr.* **14** 575–581
12. Proch F and Kempf A M 2015 *Proc. Combust. Inst.* **35** 3337–3345
13. Sircar A, Paul C, Ferreyro-Fernandez S, Imren A and Haworth D C 2017 An assessment of CFD-based wall heat transfer models in piston engines *10th U. S. National Combustion Meeting Organized by the Eastern States Section of the Combustion Institute* (College Park, MD: University of Maryland) p 35
14. Альхусан Х, Ассад М С, Пенязьков О Г и Севрук К Л 2012 *ИФЖ* **85** 968–973
15. Kee R J, Rupley F M and Miller J A 1989 CHEMKIN-II, a Fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics *Report SAND89-8009B* (Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories)
16. Golub V, Korobov A, Mikushkin A, Solntsev O and Volodin V 2018 *J. Loss Prevent. Proc. Industr.* **51** 1–7
17. Bradley D, Cresswell T and Puttock J 2001 *Combust. Flame* **124** 551–559