

О СТРУКТУРЕ ДИФФУЗИОННЫХ ПЛАМЕН

В. Ф. Соколенко, Р. С. Тюльпанов, Ю. В. Игнатенко
(Новосибирск)

Горение турбулентного диффузионного факела в ряде практически важных случаев характеризуется наличием ярко выраженных объемных зон, в которых имеет место химическая реакция. Такая ситуация складывается из-за того, что в турбулентном потоке локальные значения скорости, давления и т. д. меняются по очень сложному закону, описать который можно с помощью некоторых функций распределения ψ_i . Если имеют место два потока: топливо и окислитель, то и локальные концентрации этих компонентов описываются некоторыми функциями φ_j . Не задавая в явном виде функции ψ_i и φ_j , можно однако утверждать, что существуют в потоке такие локализованные зоны, определяемые в каждый данный момент сочетанием таких функций, условия для воспламенения и последующего горения в которых наиболее благоприятны. Этому вопросу посвящено некоторое количество работ, однако строгое теоретическое рассмотрение такой задачи в настоящее время затруднено. Экспериментальные исследования в этом направлении только начались. В работе [1] было обнаружено, что температурные неоднородности, обусловленные химическими реакциями для некоторых диффузионных пламен водорода, подчиняются статистическим закономерностям; корреляционная функция подчиняется экспоненциальной зависимости вида $e^{-\xi/\Lambda_{гор}}$, где $\Lambda_{гор}$ — средний масштаб этих неоднородностей, связанный с лагранжевым масштабом турбулентности определенной зависимостью.

Непосредственным продолжением этих исследований является настоящая работа, в которой были исследованы некоторые типы диффузионных пламен.

Принципиальная схема установки и метод, основанный на получении и обработке мгновенных тепловых фотографий структуры пламен, описаны в работе [1]. Были исследованы диффузионные пламена водорода при подаче плоской струи со стенки и по центру канала 45×45 мм (рис. 1). Предварительно в этих каналах подробно исследовались поля интенсивности турбулентности с помощью аппаратуры «Диза» и лагранжевый масштаб турбулентности диффузионным методом, в зависимости от скорости потока. Как показали исследования, интенсивность турбулентности в шероховатом канале на холодных режимах мало меняется с изменением скорости потока (наблюдается автомодельность от этого параметра), но она значительно выше, чем в гладком, а средний по те-

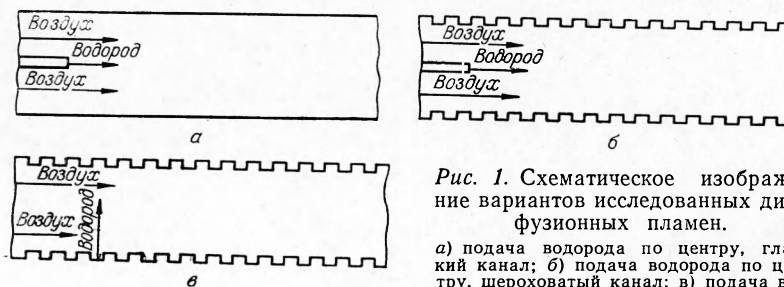


Рис. 1. Схематическое изображение вариантов исследованных диффузионных пламен.

а) подача водорода по центру, гладкий канал; б) подача водорода по центру, шероховатый канал; в) подача водорода со стенки, шероховатый канал.

чению лагранжевый масштаб турбулентности составляет величину 1,4—1,8 мм для исследуемого диапазона скоростей потока 20÷100 м/сек. Поле интенсивности турбулентности получилось аналогичным ранее измеренному в таком канале термоанемометром ЛПИ [2], однако абсолютные значения пульсаций оказались несколько выше. В некоторых случаях подачи топлива в поток воздуха были исследованы поля выгорания водорода двумя методами. Первый — это отбор проб специальным охлаждением газозаборником с последующим анализом на хроматографе Хром-3 и расчетом выгорания по изменению концентраций топлива и кислорода. Второй — определение выгорания по фотометрированию фотонегатива, полученного с длительной экспозицией со всего пламени. Основа последнего метода и экспериментальные результаты по фотометрированию гомогенных пламен содержатся в работе [3]. В настоящем исследовании этот метод определения выгорания факела сопоставлен с первым, классическим для диффузионных пламен. На рис. 2 показано сопоставление кривой выгорания $p(x)$ по длине пламени x , полученной двумя методами для одного из режимов при подаче водорода по центру канала. Как видно из графика, наблюдается хорошее согласование кривых выгорания $p(x)$ на конечных стадиях. Поэтому метод фотометрирования может быть применен для определения длины диффузионного факела, и он был использован для этой цели в последующих экспериментах.

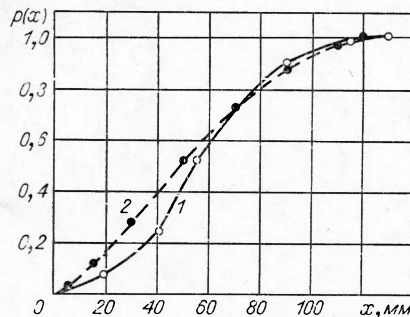


Рис. 2. Кривые выгорания диффузионного факела при подаче плоской струи водорода по центру канала. 1 — газовый анализ; 2 — фотометрирование.

Если рассматривать распространение диффузионного факела, как распространение струи, где зона химических реакций располагается в математическом приближении вдоль линии стехиометрических отношений топлива и окислителя, то задача сводится к решению обычной системы газодинамических уравнений. При некоторых дополнительных условиях эта задача имеет решение и на основе предложенных расчетных схем допускает определение полноты выгорания и некоторых других параметров горячей струи [4, 5].

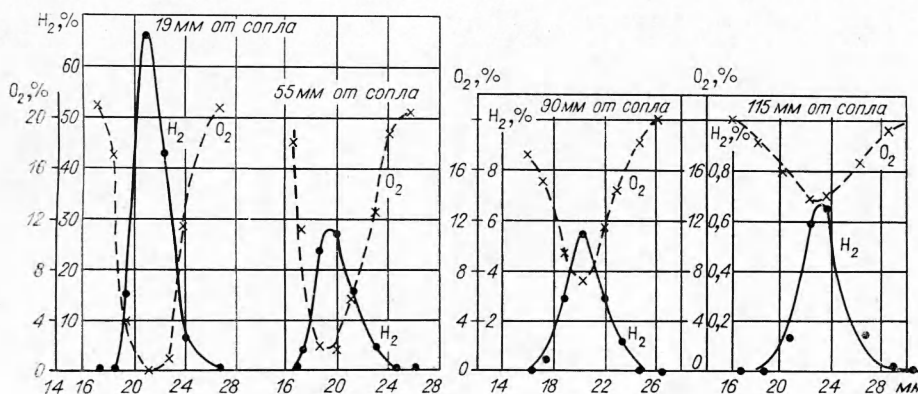
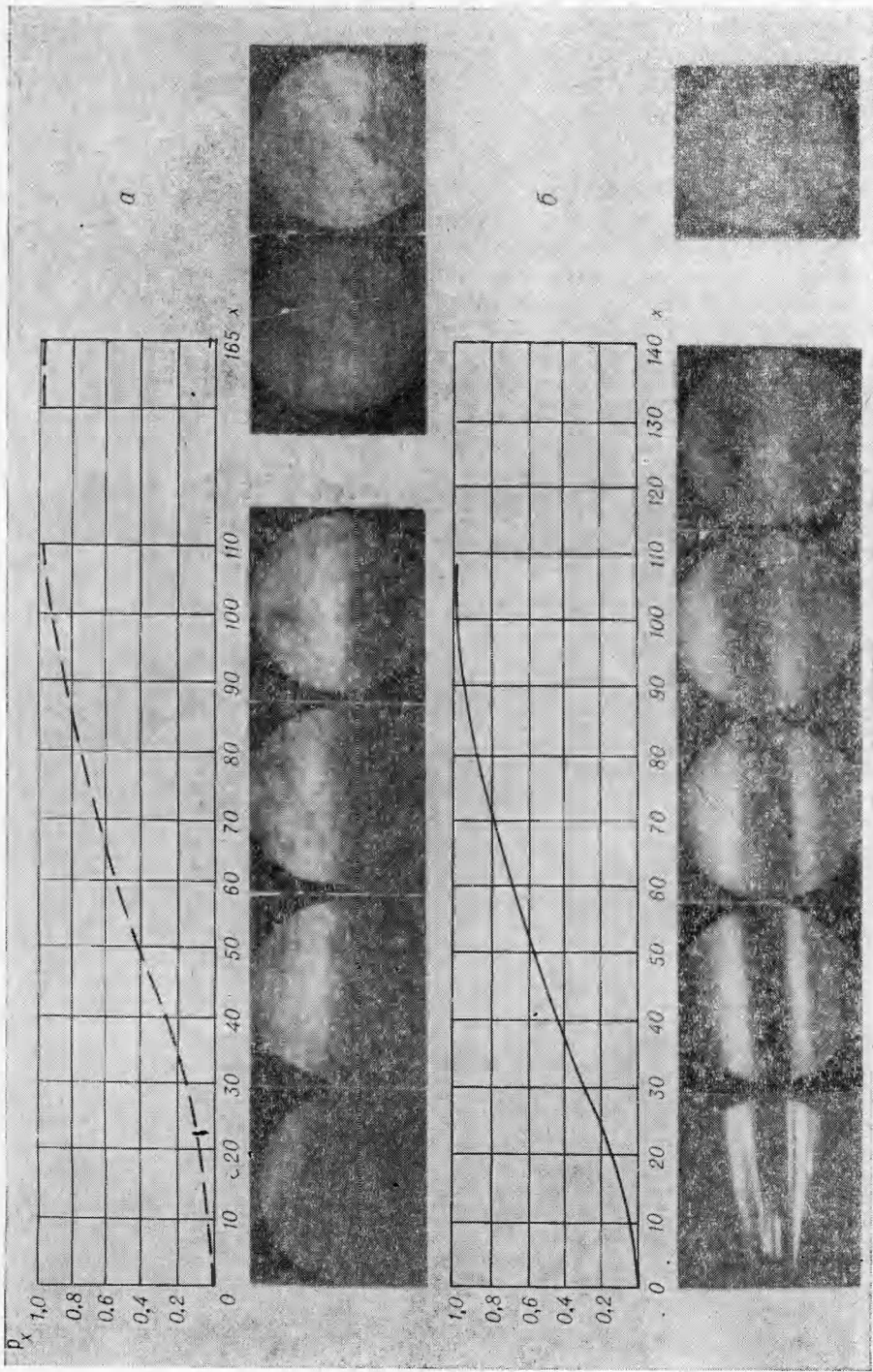
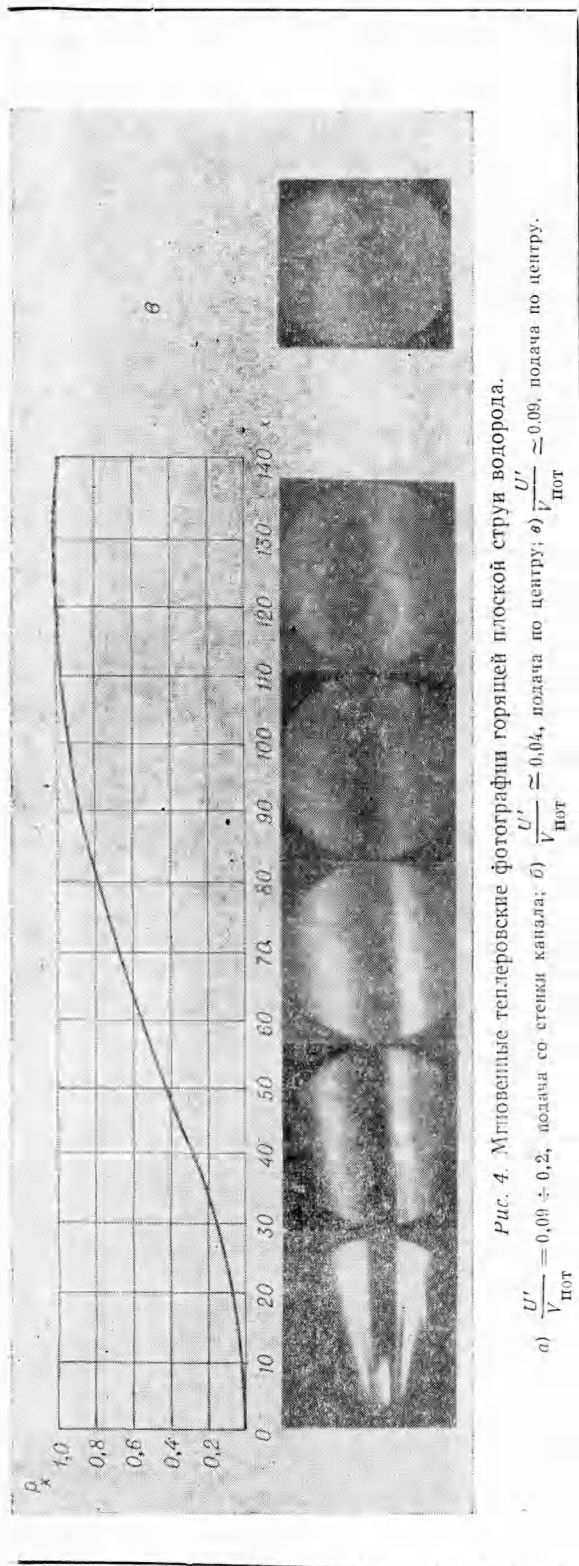


Рис. 3. Поля концентраций при горении плоской струи водорода в воздухе на различных расстояниях от ввода струи.





Измерение полей средних концентраций горячей струи в турбулентном потоке действительно показывает, что практически до полного выгорания топлива поля концентрации подобны профилям концентраций холодной струи. В том и другом случае поля концентраций описываются кривой нормального распределения Гаусса. На рис. 3 приведены поля объемной концентрации H_2 и O_2 для одного из режимов от места впуска струи H_2 до полного расходования H_2 по всему сечению. Однако такой характер изменения средней концентрации, свидетельствующий, что выгорание подчинено закономерностям, аналогичным диффузионному размытию с некоторым эффективным коэффициентом турбулентной диффузии, еще ничего не говорит о самом механизме горения, а следовательно, может включать в себя эмпирические константы, не адекватные внутреннему механизму.

Как это излагалось вначале, в ряде случаев горячая струя топлива, вводимая в поток, сразу же имеет локализованные зоны, где протекали или протекают химические реакции. Различные виды диффузионных пламен, изображенные на рис. 1, исследовались с помощью теплера ИАБ-451 и СФР в режиме лупы времени (время экспозиции 10^{-6} сек); определялась действительная картина распределения зон с градиентами показателя преломления, обусловленными температурными изменениями в результате химических реакций. При подаче плоской горячей струи водорода в

турбулентный поток со скоростью, близкой к скорости потока $\frac{V_{стр}}{V_{пот}} \approx 2$, и интенсивностью турбулентности $\frac{U'}{V_{пот}} = 0,04$ (рис. 4, б) и $\frac{U'}{V_{пот}} = 0,09$ (рис. 4, в) горение на коротких расстояниях от места подачи происходит в узкой области, в зоне смещения струи с потоком. Однако в этих сравнительно неблагоприятных для турбулентного размытия струи условиях, уже при степени выгорания $p(x) = 0,6 \div 0,7$ факел представляет собой отдельные локализованные зоны горения. Последовательные фотографии по длине факела (рис. 4, в) показывают, как начинается разрушение четкой границы между окислителем и топливом, где идут химические реакции.

При подаче плоской струи водорода со стенки перпендикулярно потоку и интенсивности турбулентности $\frac{U'}{V_{пот}} \approx 0,09 \div 0,2$ горение сразу осуществляется в отдельных зонах. Характерный пример такой горячей струи изображен на рис. 4, а, где показаны последовательные тепловоскисные фотографии пламени в различных местах по осевой координате x . Последний вариант подачи струи топлива имеет большое практическое значение, и структура такой горячей струи была исследована особенно тщательно.

В этих экспериментах процесс горения водорода в канале на фиксированном режиме снимался на чувствительную пленку. Отдельный кадр с пленки печатался с увеличением на сверхконтрастные пластины, причем с каждого кадра печатались две идентичные пластины. При помощи слабого источника света и теплера создавался параллельный пучок света, на пути которого ставились обе пластины. Свет, пройдя через обе пластины, попадал на чувствительный элемент ФЭУ-29, сигнал с которого, пройдя дискриминатор, подавался на потенциометр. Величина сигнала на потенциометре пропорциональна интегральному световому потоку, прошедшему через пластины, а величина последнего, в свою очередь, зависит от взаимного расположения пластин. При смещении одной из пластин величина сигнала изменялась, и при этом на движущейся ленте потенциометра перо выписывало корреляционную кривую. По корреляционной кривой рассчитывался средний линейный масштаб температурных неоднородностей. Подробная методика и оценки погрешности изложены в работе [6].

Обработка полученных корреляционных кривых проводилась в соответствии с работой [1]. Были определены масштабы температурных неоднородностей, соответствующие реальным объемным масштабам $\Lambda_{гор}$ в зависимости от начальной скорости потока $V_{пот}$ и соотношений топлива и воздуха.

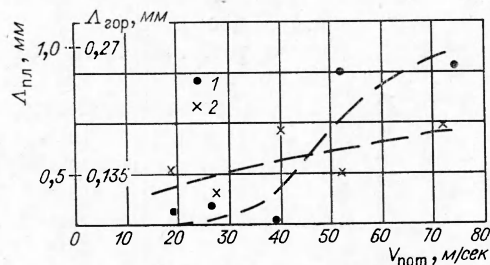


Рис. 5. Зависимость масштаба температурных неоднородностей от начальной скорости набегающего потока.

1 — $x=68$ мм; 2 — $x=180$ мм.

На рис. 5 представлена зависимость величины $\Lambda_{гор}$ от средней начальной скорости потока $V_{пот}$.

Из графика видно, что наблюдается небольшая тенденция к увеличению $\Lambda_{гор}$ с ростом $V_{пот}$. Аналогичное небольшое изменение наблюдается и для лагранжевого масштаба турбулентности по опытам, проведенным по диффузионной методике.

При уменьшении коэффици-

ента избытка воздуха α или соответствующем увеличении средней температуры в конце факела t_0 наблюдается также некоторое увеличение масштабов температурных неоднородностей $\Lambda_{гор}$ (рис. 6). Это связано с тем, что общий уровень температур в пламени увеличивается и область, где возможно воспламенение, в пределах данных структурных свойств потока расширяется.

В настоящей работе основным исследуемым топливом являлся водород, однако при горении таких углеводородных топлив, как керосин, наблюдалось аналогичное распределение зон с большими градиентами

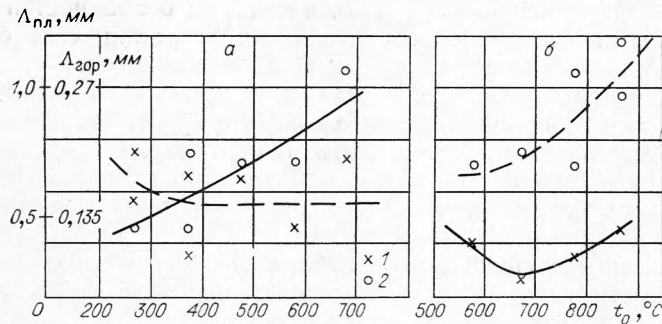


Рис. 6. Зависимость масштаба температурных неоднородностей от температуры. Средняя скорость набегающего потока 50÷80 (а) и 100÷120 м/сек (б).

1 — $x=75$ мм; 2 — $x=100$ мм.

температур, вызванных протеканием химических реакций и определяемых структурой турбулентного потока. Это было показано при горении распыленного керосина в сильно турбулированном потоке, когда капли находились в режиме испарения [2]. Указанные эксперименты позволяют надеяться связать эти локализованные зоны со структурой потока в ряде других систем и могут быть полезными при построении расчетной схемы выгорания диффузионного факела, учитывающей это свойство.

Поступила в редакцию
29/VII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. С. Тюльпанов, В. Ф. Соколенко, А. И. Алимбиев. Матер. III симпозиума по горению. Л., 1971.
2. Р. С. Тюльпанов, А. И. Алимбиев. ФГВ, 1968, 4, 3.
3. И. А. Кузнецов, Ю. В. Игнатенко. ФГВ, 1967, 3, 1.
4. Л. А. Вулис, Л. П. Ярин. ФГВ, 1970, 6, 4.
5. Л. А. Вулис, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярин. Основы горения газового факела. «Энергия», 1968.
6. L. S. G. Kovasznaу, A. Arman. The Review of Scientific Instruments, 1957, 28, 10.