

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-

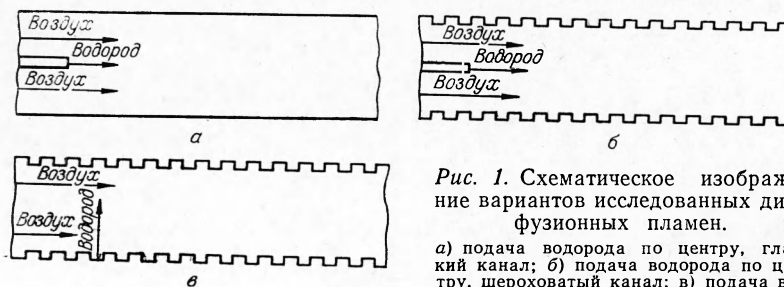


Рис. 1. Схематическое изображение вариантов исследованных диффузионных пламен.

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.

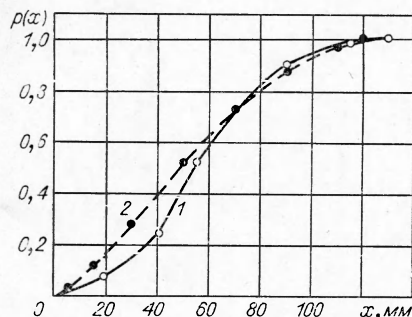


Рис. 2. Кривые выгорания диффузионного факела при подаче плоской струи водорода по центру канала. 1 — газовый анализ; 2 — фотометрирование.

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].

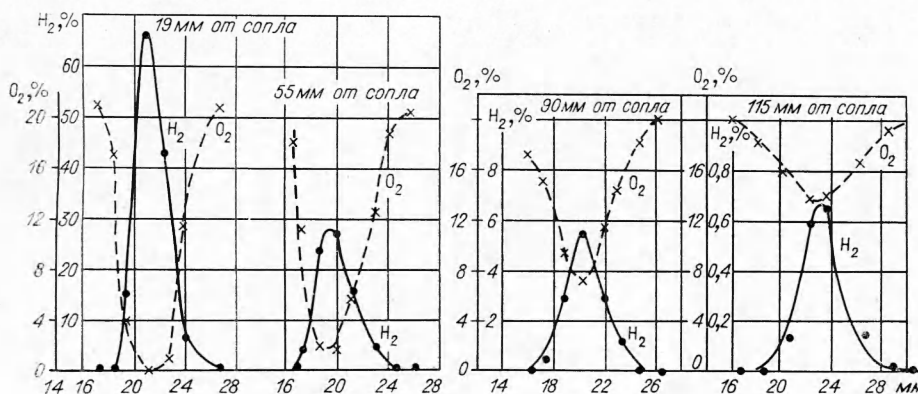
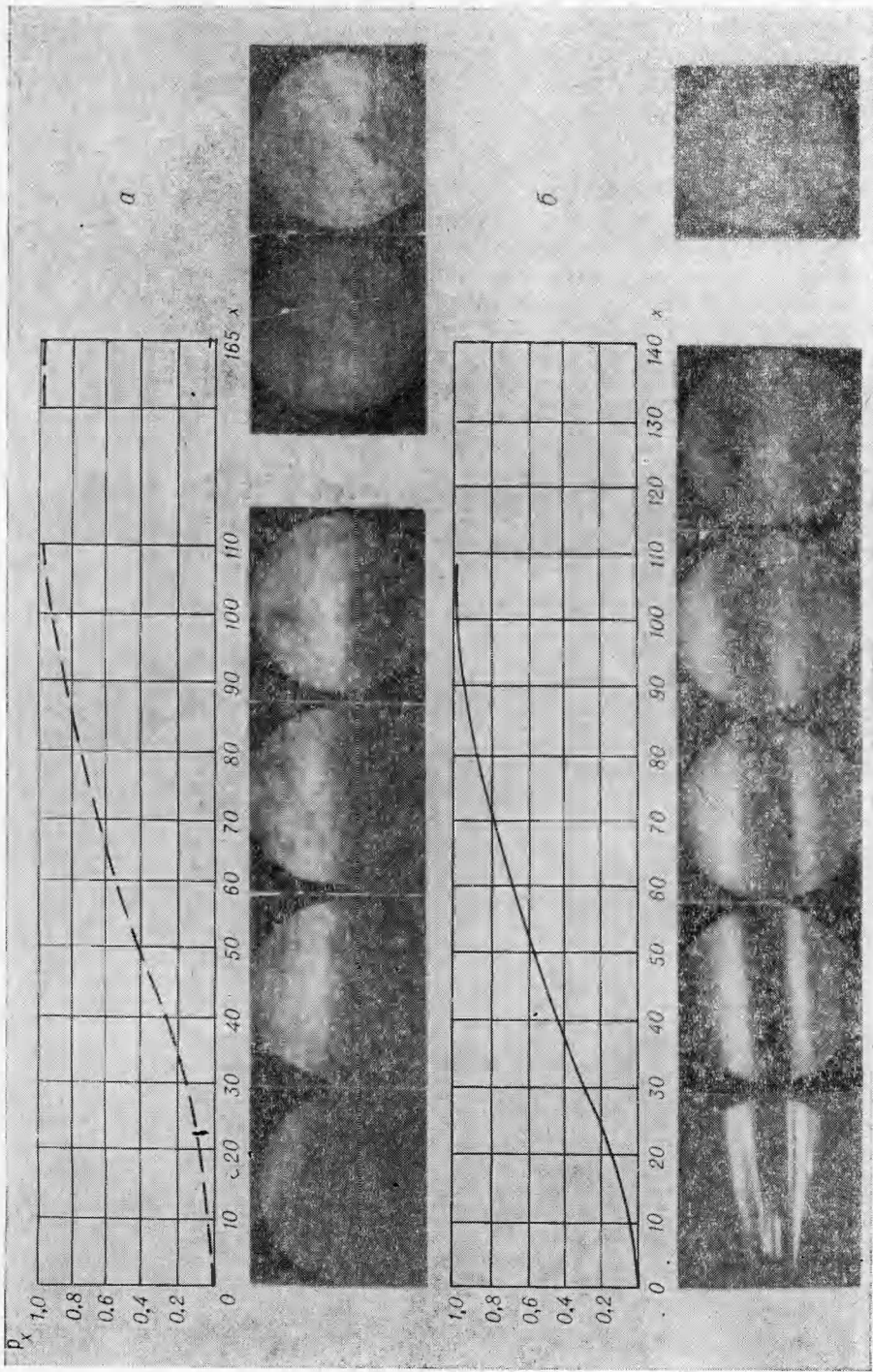
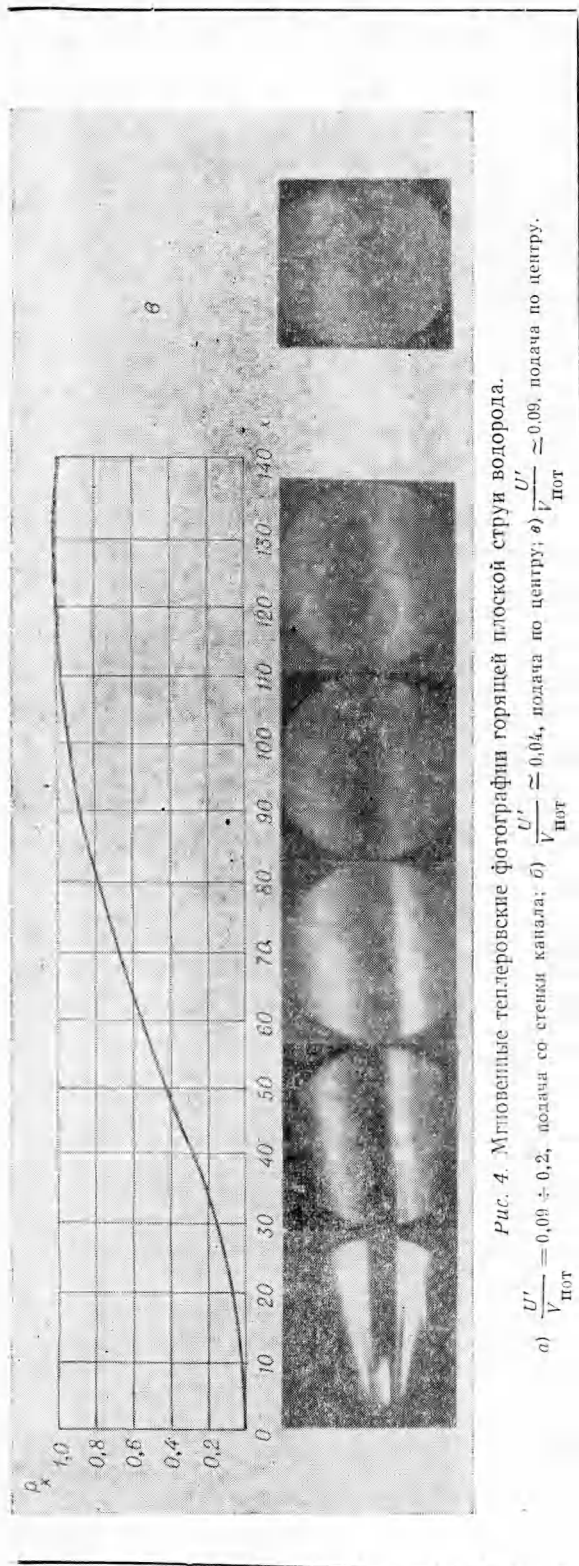


Рис. 3. Поля концентраций при горении плоской струи водорода в воздухе на различных расстояниях от ввода струи.





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.

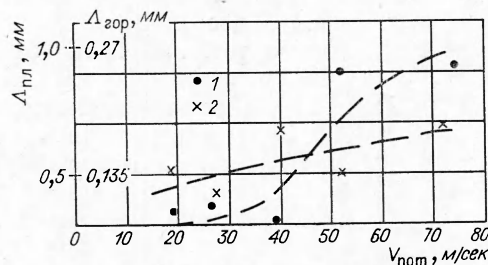


Рис. 5. Зависимость масштаба температурных неоднородностей от начальной скорости набегающего потока.

1 — $x=68 \text{ мм}$; 2 — $x=180 \text{ мм}$.

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-

