

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ ТОПЛИВА
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ**

Р. С. Тюльпанов, А. И. Алимбиев
(Новосибирск)

В ранее опубликованных работах по устойчивости факела горения капле топлива [1—3] описаны исследования в ламинарном потоке, т. е. рассмотрено стационарное взаимодействие потока и капле. В этих работах было показано, что устойчивость горения капле зависит от давления, температуры потока, содержания кислорода в нем и скорости газа относительно капле. Если горение происходит в турбулентном потоке, то взаимодействие потока с каплями будет нестационарным (влияние турбулентных пульсаций), и устойчивость горения будет определяться как вышеперечисленными величинами, так и турбулентными характеристиками потока (степенью или интенсивностью турбулентности, масштабом турбулентности и степенью неоднородности их в потоке). Исходя из этого нельзя данные, полученные для горения капле в ламинарном потоке, непосредственно переносить на горение их в турбулентном потоке.

Устойчивость индивидуальных факелов горения капле топлива при давлении их ансамбля в турбулентном потоке исследовали на экспериментальной установке, приведенной на рис. 1. Рабочий участок представлял горизонтальную трубу квадратного сечения $50 \times 50 \text{ см}^2$. Верхняя и нижняя плоскости трубы имели регулярную шероховатость в виде поперечных ребер 3 с отношением высоты к шагу 1:2 и с высотой шероховатости 2,5 мм (относительная степень шероховатости 0,1). В зоне наблюдения 4 две другие (боковые) стороны выполнялись из кварцевых пластин. Рабочий участок помещался в барокамеру с боковыми окнами из оптического стекла, поддерживающими давление до 20 ата. Топливо из центробежной форсунки 1 подавалось в поток воздуха. Для получения более однородного спектра использовалась лишь часть факела, вырезанного в виде полукольца концентричной оси форсунки. Топливный факел был направлен по потоку воздуха. На расстоянии нескольких калибров трубы от места подачи топлива через щели с двух сторон подводился водород 2 для создания дежурного факела 5, воспламеняющего пролетающие капли топлива.

Через боковые окна производилось фотографирование тепловеской картины горения с помощью прибора ИАБ-451. Источником света при фотографировании служила серия вспышек, полученная при разрядке батареи высоковольтных конденсаторов через искровой промежуток,

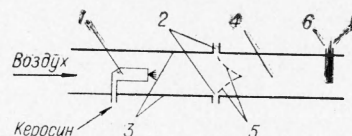


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — форсунка; 2 — водород; 3 — турбулизирующие ребра; 4 — зона наблюдения; 5 — дежурный факел; 6 — газовый анализ; 7 — термопара.

заполненный водородом. Продолжительность одной искры ориентировочно 10^{-5} сек. Фотографировали фоторегистром ФР-11. Это позволило получить «мгновенные» фотографии горящих капель при сравнительно умеренных скоростях движения до 100 м/сек. Для получения треков горящих капель источником света была ртутная лампа. Через эти же окна велось и визуальное наблюдение за воспламенением факела.

Температура газа в зоне наблюдения 4 измерялась отсосной охлаждаемой платина-платинородиевой термпарой 7. Отбор газа для анализа осуществлялся через отдельный канал 6, размещенный в кожухе термпары, чтобы избежать каталитического окисления забираемых продуктов сгорания.

Многие параметры измерялись не в процессе огневых опытов, а предварительно в изотермических условиях с дальнейшим пересчетом. Это, в частности, относится к определению размеров капель топлива и измерению характеристик турбулентного потока.

Для улавливания капель из потока был изготовлен специальный заборник, изображенный на рис. 2. В каждом из двух коаксиальных цилиндров 2 и 3 сделаны вертикальные щели длиной 50 мм. Во внутренний цилиндр помещалось предметное стекло 4 в плоскости, перпен-

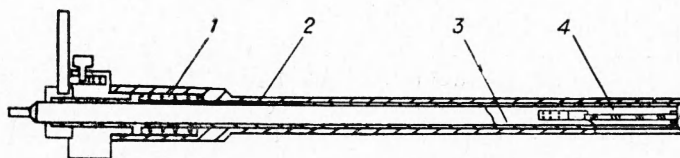


Рис. 2. Схема заборника капель.

дикулярной направлению потока. Внешний цилиндр и предметное стекло закреплялись неподвижно, а внутренний цилиндр мог вращаться под действием пружины 1. В момент совпадения щелей внешнего и внутреннего цилиндров капли из потока попадали на предметное стекло. Поверхность предметного стекла покрывалась диметилдихлорсиланом. Сразу же после забора капель производилось микрофотографирование центральной части стекла. Дальнейшая обработка велась в соответствии с методикой, описанной в [4, 5].

Как показывают многочисленные эксперименты, при распыле жидкости центробежными форсунками спектр размеров капель хорошо описывается нормальным Гауссовским законом:

$$W = e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^m},$$

где W — весовая доля капель диаметра большего d_0 ; d_0 — весовой медианный диаметр капли, m ; d — диаметр капли, m ; m — показатель полидисперсионности.

Для форсунки, использованной в экспериментах, были получены в результате предварительных измерений $m=2,5$, $d_0=90$ м.

Были измерены поля средних скоростей и турбулентные характеристики потока в рабочей части экспериментальной установки. Средние скорости потока определялись по показаниям трубки Пито и измерениям статистического давления на стенке. Измерение турбулентности производилось термоанемометром конструкции Ленинградского политехнического института. В качестве меры степени турбулентности ε в работе принято отношение среднеквадратичного отклонения скорости потока к средней расходной скорости [6].

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}_{\text{ср}}}$$

Следует ожидать, что при умеренных скоростях потока и расположении нити термоанемометра перпендикулярно вектору средней скорости, средние по времени значения пульсационной скорости, полученные в Эйлеровом представлении течения, могут с известным приближением рассматриваться как среднеквадратичные значения пульсационной скорости $\sqrt{\overline{(u')^2}}$ (в Лагранжевом описании течения). Значения u' получены для различных точек течения непосредственным осреднением в схеме измерений пульсаций скорости потока термоанемометром. Значения $\bar{u}_{\text{ср}}$ получены по расходу воздуха через установку с помощью мерной шайбы:

$$\bar{u}_{\text{ср}} = \frac{G}{\rho F},$$

где $\bar{u}_{\text{ср}}$ — среднерасходная скорость потока, м/сек; G — расход воздуха, кг/сек; ρ — плотность воздуха, кг/см³; F — поперечное сечение рабочего участка трубы, м².

На рис. 3 представлены поля средней скорости и значения интенсивности турбулентности (между шероховатыми стеклами от центра до стенок $h/H=0,9$). Ядро потока $0 < \frac{h}{H} < 0,5$ можно охарактеризовать определенным значением $\varepsilon = 0,052 \pm 0,001$. Для определения масштаба турбулентности были сняты осциллограммы пульсаций скорости потока (в Эйлеровом представлении течения) при различных Re трубы при $h/H=0$ и $h/H=0,8$. Эти осциллограммы обрабатывались в соответствии с принятыми в теории турбулентных течений и определялись значения коэффициента Эйлеровой временной корреляции R_E :

$$R_E(\tau) = \frac{\overline{u(t) \cdot u(t+\tau)}}{\overline{(u')^2}};$$

где $u(t)$ и $u(t+\tau)$ — значения пульсационных скоростей в некоторой фиксированной точке в момент t и $t+\tau$.

Строя зависимость $R_E(\tau) = f(\tau)$, находили значения Эйлерова интегрального масштаба времени J_E . Для определения пространственного интегрального масштаба по этим данным использовалась гипотеза Тейлора

$$\frac{\partial}{\partial t} = -u \frac{\partial}{\partial x},$$

справедливая, вообще говоря, только для одно-

родного течения с постоянной средней скоростью $\bar{u}_{\text{ср}}$ в направлении x . Для течения с поперечным сдвигом, имеющим место в настоящем случае, эти соотношения выполняются лишь в известном приближении. Тогда пространственный интегральный масштаб будет $\Delta f = \bar{u}_{\text{ср}} J_E$. Некоторые эмпирические соотношения позволяют думать, что порядок

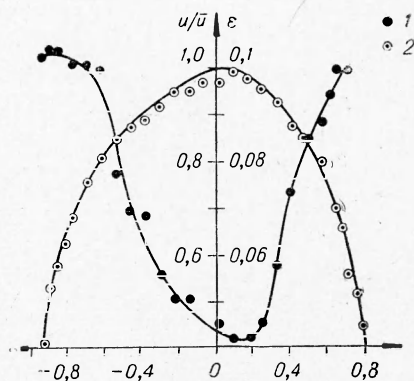


Рис. 3. Поля степени турбулентности и средней скорости по сечению канала.

1 — кривая, характеризующая степень турбулентности в потоке; 2 — кривая поля средней скорости.

величины Λ_f и Λ_L (пространственный масштаб в Лагранжевом представлении) одинаков, что позволило определить значение Λ_L по данным проведенных экспериментов. Для режимов, при которых производились эксперименты, величина Λ_L на два порядка больше, чем средний размер капель топлива, и составляет 7-30 мм, т. е. выполняются условия $\frac{d_0}{\Lambda_f} \ll 1$.

Опыты производились с керосином марки Т-1 в диапазоне изменения температуры от 350 до 1700° К, концентрации кислорода в газе CO_2 от 14 до 35%, давления от 1,3 до 4,5 ата, концентрации капель от 10 до 40 капель в см^3 . Средний размер капель во всех экспериментах 90 мк.

Эксперименты проводились по следующей схеме: при определенном расходе водорода изменением подачи воздуха находился режим «срыва» пламени с горящих капель. Наступление этого режима определялось визуально по менее яркому свечению горящих капель и уменьшению общего числа треков. При выходе на режим «срыв» производилась регистрация давления, температуры в зоне наблюдения, расхода воздуха, отбирался газ для анализа. Затем меняли подачу водорода, что изменяло температуру в зоне наблюдения и повторяли все операции. В ряде экспериментов производилась дополнительная подача кислорода в поток воздуха.

В результате экспериментов была получена зависимость средней пульсационной скорости, при которой происходит срыв пламени с капель, от температуры и содержания кислорода в потоке (рис. 4). Эта величина может служить наглядной характеристикой устойчивости горения капли топлива в турбулентном потоке аналогично «срывной скорости», определяемой в [2, 3].

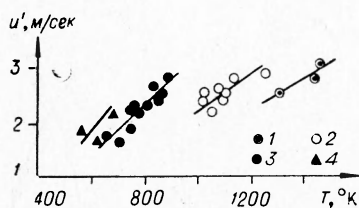


Рис. 4. Зависимость средней пульсационной скорости срыва от температуры.
Кислорода в газе: 1 — 14%; 2 — 16%; 3 — 18%; 4 — 22%.

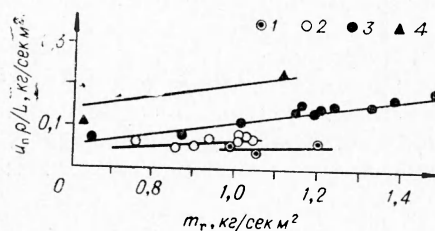


Рис. 5. Зависимость комплекса $u_n \rho / L$ от m_r .
Кислорода в газе: 1 — 14%; 2 — 16%; 3 — 18%; 4 — 22%.

Далее предпринималась попытка проверки применимости соотношения Сполдинга, характеризующего устойчивость горения жидкого топлива, на случай горения распыленного топлива в турбулентном потоке. Сполдинг [1] показал, что горение устойчиво, если

$$\frac{u_n \rho}{L} \geq m_s,$$

где u_n — нормальная скорость распространения ламинарного пламени в гомогенной топливо-воздушной смеси, м/сек; ρ — плотность газа, $\text{кг}/\text{см}^3$; L — количество газа (при данном содержании кислорода), приходящееся на грамм топлива в стехиометрической смеси; m_s — массовый поток топлива через поверхность расположения пламени, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{сек}$. Обработка полученных результатов производилась на основании приведенных

ниже рассуждений и эмпирических формул. Количество тепла, поступающего к капле топлива, равно:

$$Q = \alpha (T_r - T_k),$$

где Q — количество тепла, поступающего от газа к поверхности капли, *ккал*; α — коэффициент теплоотдачи, *ккал/м²сек · град*; T_r — температура газа, окружающего каплю; T_k — температура поверхности капли, °С.

Массовый поток паров топлива через поверхность S , на которой с наибольшей вероятностью располагается фронт горения, равен:

$$m_s = m_r \left(\frac{d}{d_s} \right)^2,$$

где d — диаметр капли, *м*; d_s — диаметр сферы, на которой с наибольшей вероятностью располагается фронт горения, *м*; m_r — массовый поток топлива с единицы поверхности капли в единицу времени, *кг/м² · сек*.

Из уравнения баланса тепла для капли топлива в потоке газа имеем

$$m_r \left(\frac{d}{d_s} \right)^2 = \frac{\alpha (T_r - T_k)}{q + C_p (T_r - T_k)},$$

где q — скрытая теплота испарения единицы топлива, *ккал/кг*; C_p — теплоемкость топлива при постоянном давлении, *ккал/кг · град*. Коэффициент теплоотдачи находился с помощью эмпирической формулы, справедливой для имеющих место в работе аэродинамических условий [7]

$$Nu = 2,8 \frac{\lambda}{d} \varepsilon^{0,5} Re^{0,5}$$

или

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 2,8 \sqrt{Re'},$$

где Nu — число Нусельта; Re — число Рейнольдса, подсчитанное по средней скорости потока; Re' — число Рейнольдса, подсчитанное по средней пульсационной скорости.

Окончательно получим

$$m_r \left(\frac{d}{d_s} \right)^2 = 2,8 \sqrt{Re'} \frac{\lambda}{d} \frac{(T_r - T_k)}{(T_r - T_k) C_p + q}.$$

Нормальная скорость распространения пламени рассчитывалась по эмпирической формуле:

$$\frac{u_n}{u_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-0,15} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{3,42 - 0,1 L}{0,133 L} \right),$$

где u_n — нормальная скорость распространения пламени по гомогенной смеси топливо — воздух, *м/сек*; L — количество газа (при данной концентрации кислорода), приходящееся на грамм топлива в стехиометрической смеси; $u_0 = 1$ *м/сек* — нормальная скорость распространения пламени по гомогенной топливо-воздушной смеси при $T_0 = 20^\circ \text{С}$, $p_0 = 1$ *ата* и $L_0 = 14,7$ (концентрация $\text{O}_2 = 21\%$), p — давление; T — температура.

Зависимость нормальной скорости от давления и температуры для гомогенной керосино-воздушной смеси взята из данных Иноземцева [8], а зависимость от L — аппроксимацией экспериментальных данных

