

УДК 543.825.3

ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОЙ ВЫСОТЫ СТРУЙНОГО ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ КЕРОСИНА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

С. К. Бирва, Д. П. Мишра

Индийский технологический институт, 208016 Канпур, Индия, mishra@iitk.ac.in

Проведено экспериментальное исследование структуры пламени керосина Jet A1 в неограниченном пространстве при различных расходах горючего и соотношениях потоков импульса горючего и воздуха (MFR). Для распыления горючего использовалась вихревая форсунка. Установлено, что высота пламени увеличивается с ростом MFR при фиксированном расходе горючего. Однако при фиксированном значении MFR высота пламени с ростом расхода горючего сначала уменьшается, а затем увеличивается. Установлена корреляция высоты пламени с уровнем тепловой мощности и величиной MFR в безразмерной форме с помощью оптимального плана для поверхности отклика. Исследована зависимость бедного предела срыва пламени от расхода горючего: сначала бедный предел увеличивается до некоторого максимального значения, а затем уменьшается в соответствии с зависимостью высоты пламени на бедном пределе срыва от расхода горючего. При большом расходе горючего в верхней части пламени наблюдается светящаяся зона синего цвета. Полученные зависимости объяснены изменением характеристик распыления керосина.

Ключевые слова: керосин, струйное горение, планирование экспериментов, соотношение потоков импульса, вихревая форсунка.

DOI 10.15372/FGV20150403

ВВЕДЕНИЕ

В двигателях, работающих на жидком топливе (керосин, дизельное топливо, мазут), топливо под высоким давлением впрыскивается через форсунки в камеру сгорания. В результате образуется аэрозоль, что позволяет быстро испарить горючее и обеспечить его максимально полное сгорание. Благодаря высокой удельной энергии и удобству использования, авиационное топливо широко применяется в авиакосмической промышленности. Определение характеристик пламени керосина играет важную роль: по высоте пламени можно судить о степени сгорания топлива, теплопотерях, величине выбросов загрязняющих веществ и т. п. Помимо этого, форма и размер пламени определяют, какой должна быть длина камеры сгорания. Поэтому в ряде работ [1–7] проводились эксперименты по определению характеристик пламен распыленных топлив. Авторы работы [1] одними из первых выполнили эксперименты с пламенами топлив, распыленных через двух-

канальные форсунки. Они пришли к заключению, что исследуемое пламя распыленного керосина в неограниченном пространстве ведет себя аналогично струйному газовому диффузионному пламени. В работах [2, 3] были предприняты попытки проверить этот вывод. В работе [8] на основе результатов экспериментов по горению одиночных капель проведено моделирование пламен распыленных топлив. Предполагалось, что тепло от пламени к поверхности капли передается за счет теплопроводности, а пары горючего попадают во фронт пламени за счет молекулярной диффузии [9]. Эксперименты [10] с использованием камеры сгорания газотурбинного двигателя показали, что при $\Delta p = 15$ атм имеет место переход от диффузионного горения капель к горению полностью испаренного топлива. Одно из первых численных исследований зажигания распыленного топлива на основе расчета динамики двухфазных систем выполнено в работе [11], был установлен тот важный факт, что процесс зажигания распыленного топлива является по своей природе стохастическим.

Структура течения воздуха в первичной зоне пламени оказывает большое влияние

на его устойчивость. Обычно в горелочных устройствах применяется вихревая закрутка воздуха. В пламени, стабилизированном в закрученном потоке, струя горючего проходит через устойчивый тороидальный вихрь [12, 13], который определяется как зона рециркуляции, образованная за счет закрутки коаксиального воздушного потока, окружающего струю горючего. Поэтому, аналогично плохообтекаемому телу, закрутка позволяет создать точки торможения, действующие как стабилизаторы пламени [14]. Таким образом, закрученный поток выступает как стабилизирующий фактор, поскольку он увеличивает время, в течение которого одновременно сосуществуют горючее, воздух и горячие продукты [15]. Это способствует испарению капель горючего и обеспечивает более эффективное перемешивание горючего и воздуха. Чтобы охарактеризовать степень закрутки осевого потока, в работе [16] было предложено использовать безразмерный параметр — параметр закрутки [17]

$$S_N = \frac{2G_m}{G_T D_{sw}}, \quad (1)$$

где G_m — осевой поток тангенциальной составляющей импульса, G_T — осевая тяга, D_{sw} — внешний диаметр завихрителя.

Несмотря на то, что высота пламени используется в литературе как характеристика диффузионного пламени, она не может служить параметром, характеризующим скорость распространения пламени предварительно перемешанной смеси. В ряде работ [4, 18] высота пламени применялась для описания диффузионных газовых пламен, в [5–7, 19] установлены ее корреляционные соотношения с другими параметрами. В работе [20] предпринята попытка объяснить механизм влияния степени закрутки потока на входе и размера капель на структуру пламени распыленного топлива, установлено, что более сильная закрутка приводит к уменьшению высоты пламени за счет улучшения смешивания. В работе [21] детально изучено влияние геометрии горелки и других параметров на высоту пламени легкого дистиллятного топлива при пониженном давлении в ограниченном пространстве. Авторы работы [22], исследуя характеристики пламени распыленного керосина в кислороде при различных давлениях, обнаружили, что высота пламени уменьшается с увеличением внешнего давления. Исследование бедного предела

срыва пламени также важно, поскольку результаты позволят в дальнейшем подобрать оптимальный состав бедной смеси, снизить выбросы вредных веществ и произвести требуемое количество теплоты или мощности, а кроме того, дать правильную оценку того, насколько пламя устойчиво. До настоящего времени исследований высоты и предела срыва пламени авиационного керосина Jet A1 в неограниченном пространстве не проводилось. В данной работе изучается влияние расхода горючего, а также влияние соотношения потоков импульса горючего и воздуха на высоту пламени. Установлена корреляция между значениями безразмерных величин — высоты пламени, тепловой мощности и соотношения потоков импульса. В работе также исследована зависимость предела срыва пламени от расхода горючего. Для этого рассмотрено влияние соотношения потоков импульса горючего и воздуха на высоту пламени.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для подачи горючего применялась вихревая форсунка, а воздух пропускаться через завихритель (см. рис. 2). Форма и структура пламени регистрировались камерой Casio Exilim EX-F1.

Исследовалось горение керосина Jet A1 от компании Indian Oil. В емкость для горючего объемом 6 л нагнетался сжатый воздух, что обеспечивало подачу жидкого горючего в фор-

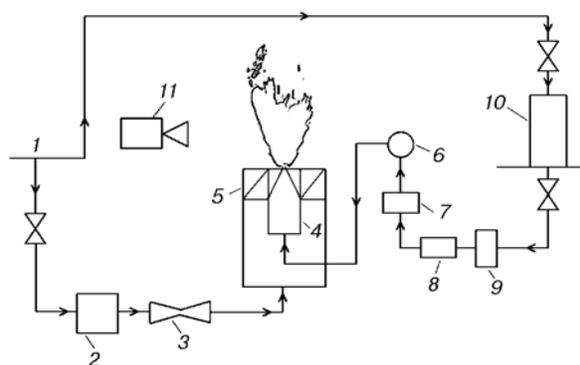


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — воздух из компрессора, 2 — фильтр, 3 — трубка Вентури, 4 — форсунка, 5 — завихритель, 6 — электромагнитный клапан, 7 — расходомер горючего, 8 — фильтр тонкой очистки, 9 — фильтр грубой очистки, 10 — емкость с горючим под давлением, 11 — камера

сунку. Для предотвращения засорения форсунки жидкое горючее подвергали двухступенчатой очистке от примесей различного размера. Сначала его пропускали через набор мелких сеток для удаления крупных примесей, а затем через фильтр с размером пор 15 мкм для окончательной очистки. Расход горючего измерялся цифровым расходомером 114 Flowmeter (Range 5Н, McMillan Company) с рабочим диапазоном $50 \div 500$ мл/мин. Включение и отключение подачи горючего осуществлялось электромагнитным клапаном.

Для устранения неустойчивости потока воздуха линия его подачи была оснащена форкамерой. Массовый расход воздуха измерялся трубкой Вентури, которая была подсоединена к U-образному дифференциальному манометру, заполненному дистиллированной водой. Расходомер Вентури был откалиброван в диапазоне расходов $5.3 \div 22.5$ г/с с погрешностью 2 % в доверительном интервале 95 %.

Вихревая форсунка выбрана с диаметром выходного отверстия $d_0 = 0.3$ мм (рис. 2). Именно такой диаметр обеспечивает наилучшее распыление горючего. Остальные параметры форсунки были такими же, как в работе [23]. Отношение длины канала форсунки к диаметру на выходе (L_0/d_0) составляло 1.25. Для придания вращательного движения потоку использовалась спиралевидная вставка [23] диаметром D_s и длиной L_s по 5 мм. Завихритель имел два входа ($n = 2$) сечением $w \times l = 0.65$ мм², угол поворота $\varphi = 23^\circ$. Степень завихрения потока горючего зависит от размеров

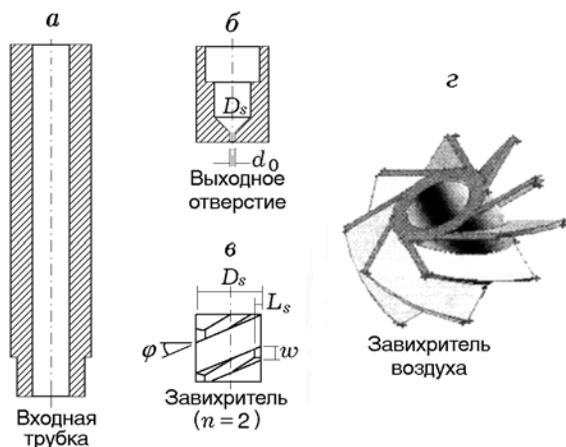


Рис. 2. Вихревая форсунка топлива (а, б), завихритель с двумя входами (в) и завихритель воздуха (г, $S_{N,a} = 0.67$)

этой спиралевидной вставки. Коэффициент закрутки $S_{N,f}$ [24] определялся по формуле

$$S_{N,f} = \frac{\pi d_0 D_s \cos \varphi}{4nwl} \quad (2)$$

и составлял примерно 0.8. Для придания вихревого движения потоку воздуха использовался воздушный завихритель, который показан на рис. 2. Его коэффициент закрутки рассчитывался по формуле [17]

$$S_{N,a} = \frac{2}{3} \tan \theta, \quad (3)$$

где θ — угол лопаток относительно горизонтали при горизонтальном расположении завихрителя, его также называют углом закрутки. Он составлял 45° , что обеспечивало коэффициент закрутки $S_{N,a} \approx 0.67$. Завихритель имел восемь лопаток толщиной 1.2 мм и длиной 7.5 мм. Форсунка располагалась в центре этого завихрителя, внешний диаметр которого равнялся 30 мм. В емкость с горючим нагнетался сжатый воздух до давления 9 атм. Расход горючего изменялся в пределах $56 \div 107$ мл/мин. Соотношение потоков импульса задавалось в интервале $353 \div 966$ путем варьирования количества подаваемого воздуха.

2. БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для получения корреляций между высотой пламени, соотношением расходов горючего и соотношением потоков импульса использовались приводимые ниже безразмерные параметры.

Соотношение уровней тепловой мощности (P_r) определялось как отношение тепловой мощности при заданном расходе горючего к тепловой мощности при максимальном расходе горючего:

$$P_r = \frac{G_f \rho_f Q}{G_{\max} \rho_f Q}, \quad (4)$$

где G_f — заданный расход горючего, G_{\max} — максимальный расход горючего, составляющий в данной работе 107 мл/мин, ρ_f — плотность керосина Jet A1 (807.5 кг/м³), Q — теплота сгорания керосина Jet A1 (43.1 МДж/кг).

Безразмерная высота пламени (H_r) определялась как отношение высоты пламени (H) к диаметру выходного отверстия используемой вихревой форсунки (d_0):

$$H_r = H/d_0. \quad (5)$$

В данной работе $d_0 = 0.3$ мм. Ниже под термином «высота пламени» подразумевается его безразмерная высота.

Соотношение потоков импульса (MFR) определялось как отношение потока импульса горючего к потоку импульса воздуха, выходящего из завихрителя по нормали к нему:

$$\text{MFR} = \frac{\rho_f (v_f \sin \varphi)^2}{\rho_a (v_a \sin \theta)^2}, \quad (6)$$

где v_f и v_a — средние скорости потоков горючего и воздуха соответственно на выходе из форсунки и завихрителя.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе применялся метод характеристических поверхностей [25, 26] — эмпирический статистический метод, основанный на регрессионном анализе данных, полученных в последовательности спланированных экспериментов [27]. Этот метод позволяет установить связь между несколькими независимыми переменными (факторами) и одной или более зависимыми переменными (откликами). В данной работе он применялся для двух факторов — соотношения уровней тепловой мощности и соотношения потоков импульса. В качестве отклика рассматривалась безразмерная высота пламени. В качестве метода планирования эксперимента выбран D-оптимальный план вместо наиболее часто используемого центрального композиционного плана, поскольку в этом случае не было необходимости проводить эксперименты вне пространства проектных параметров. Для обеспечения надежности центрального композиционного плана требуется выполнение нескольких экспериментов вне пространства проектных параметров. Методы планирования эксперимента используются до, во время и после регрессионного анализа для определения точности модели.

Съемку пламени проводили цифровой камерой Casio Exilim EX-F1. Сначала была получена серия видеозаписей видимого пламени с частотой 30 кадр/с, затем каждая видеозапись была преобразована в набор отдельных кадров (изображений). Эксперименты выполняли в совершенно темном помещении. Сначала изображения преобразовывались в бинарный формат. Области красного, зеленого или

синего цвета размером более 80 пикселей рассматривались как пламя. Для измерения высоты пламени использовали такие методы обработки изображений, как сглаживание, увеличение резкости, выделение контура, с целью точно определить вершину пламени с помощью кода MatLab. Значение высоты пламени в пикселях умножалось на определенный коэффициент для получения фактической высоты пламени. Данные серии экспериментов по высоте одного и того же пламени осреднялись, и вычислялось стандартное отклонение для определения случайных погрешностей. Средняя ошибка определения высоты пламени с целью установления корреляционных соотношений составляла около 16 %, а с целью определения пределов срыва — около 10 %.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Зависимость высоты пламени от соотношения потоков импульса

Высота пламени — один из важнейших параметров, используемых для описания диффузионного пламени. На рис. 3 показаны зависимости безразмерной высоты пламени от соотношения потоков импульса MFR при различных расходах горючего. Установлено, что высота пламени увеличивается с ростом MFR при всех расходах горючего. Заметим, что увеличение MFR достигалось за счет поддержа-

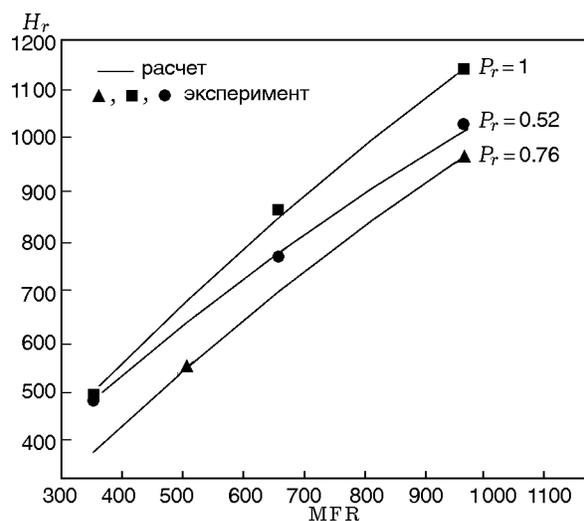


Рис. 3. Зависимость безразмерной высоты пламени от соотношения потоков импульса при различных расходах горючего

ния постоянным потока горючего и уменьшения расхода воздуха. Уменьшение расхода воздуха приводит к тому, что пламя начинает существовать в режиме, контролируемом выталкивающей силой. Такой вывод был сделан по характеру изменения структуры пламени и увеличению его высоты. По мере снижения количества подаваемого воздуха его становится недостаточно для обеспечения полного сгорания капель горючего на малой высоте в пламени, поэтому устанавливаются условия обогащения горючим. В этих условиях процесс горения в значительной мере зависит от увлечения атмосферного воздуха. В результате этого капли горючего способны достигать больших высот, где они, смешиваясь с воздухом, формируют факел. Таким образом, видимая высота пламени увеличивается с уменьшением расхода воздуха, что связано с подсасыванием атмосферного воздуха и смешиванием с ним топлива.

4.2. Зависимость высоты пламени от расхода горючего

Как видно из рис. 3, высота пламени увеличивается с ростом MFR при заданном соотношении P_r . Следует отметить, что при фиксированном значении MFR зависимость от P_r позволяет установить влияние поведения аэрозоля на пламя. В этом случае средний коэффициент избытка горючего на выходе из горелки в некоторой степени можно считать постоянным. Таким образом, увеличение тепловой мощности в этом случае просто означает увеличение расхода горючего при фиксированном коэффициенте его избытка. Поэтому изменение потока горючего приводит к образованию более мелкого аэрозоля за счет более высокой силы тяги и более интенсивного смешивания с окружающим воздухом. Тот факт, что кривая для $P_r = 0.76$ ниже кривых для $P_r = 1.0$ и 0.52 на рис. 3, можно объяснить, обратившись к данным, представленным на рис. 4. Как видно, для данного значения MFR безразмерная высота пламени уменьшается с ростом расхода горючего до некоторого минимального значения, а затем увеличивается. Параболический вид зависимости предполагает, что высота пламени при $P_r = 1.0$ и 0.52 будет больше, чем при $P_r = 0.76$. Установлено, что эти кривые при постоянных значениях MFR — параболы, т. е. высота пламени сначала уменьшается при малых расходах горючего, а затем увеличивается

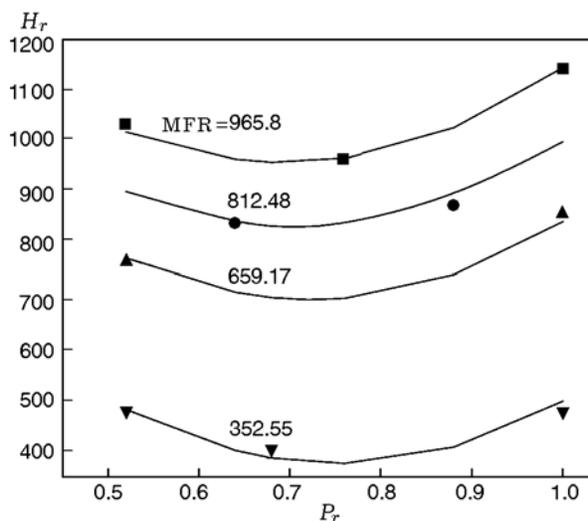


Рис. 4. Зависимость безразмерной высоты пламени от расхода горючего при различных соотношениях потоков импульса:

точки — эксперимент, линии — расчет

при более высоких расходах. Эту зависимость можно объяснить, обратившись к результатам экспериментов [23], в которых определяли характеристики распыления на вихревой форсунке. В этих экспериментах в качестве распыляемой жидкости использовалась вода. Однако поскольку вода и керосин представляют собой слабвязкие жидкости, можно предположить, что керосин будет иметь сходные с водой характеристики распыления.

С ростом расхода горючего средний диаметр капель горючего по Заутеру (SMD) сначала уменьшается, а угол распыления струи увеличивается. Это приводит к более эффективному распылению и перемешиванию на низкой высоте в пламени и, как следствие, к уменьшению высоты пламени. При дальнейшем увеличении расхода горючего начиная с некоторого его значения средний диаметр капель SMD и угол распыления струи практически не изменяются [23, 24]. С ростом расхода горючего увеличивается импульс его капель. Несмотря на более эффективное распыление, это приводит к тому, что капли горючего успевают покинуть первичную зону пламени. Они сгорают в верхней части первичного пламени, формируя светящуюся область синего цвета. Размер пламени предварительно перемешанной смеси увеличивается с повышением скорости подачи горючего, что подтверждает рис. 5 (вторичное пламя синего цвета имеет больший размер).

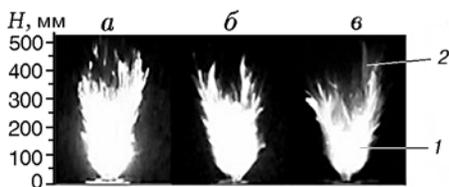


Рис. 5. Фотографии пламени при $MFR = 352.55$ и $P_r = 0.52$ (а), 0.68 (б), 1 (в):

1 — первичное диффузионное пламя, 2 — вторичное пламя предварительно перемешанной смеси; масштаб $\approx 14.7 : 1$

На рис. 5 видно, что в случае $P_r = 0.52$ из-за недостаточной степени распыления некоторые капли горят в верхней части первичного пламени. Однако при увеличении расхода горючего распыление становится более эффективным, поэтому в верхней части при $P_r = 0.68$ отдельных горящих капель не наблюдается. Таким образом, высота пламени в этом случае меньше, чем при $P_r = 0.52$. Светящаяся область синего цвета наблюдается при $P_r = 1.0$, т. е. когда происходит более эффективное распыление и характер горения существенно зависит от импульса частиц. Из рис. 5, в видно, что большое число капель минует первичную зону пламени и сгорает в верхней ее части, где имеется достаточное количество воздуха. При этом за счет более эффективного распыления отдельные горящие капли, как в случае $P_r = 0.52$, не видны, но в верхней части первичного пламени преобладает светящаяся зона синего цвета. Таким образом, высота пламени слабо уменьшается начиная с $P_r = 0.52$ до минимального значения, а затем последовательно возрастает при данном MFR . Как видно из рис. 3, с ростом значения MFR высота пламени увеличивается при фиксированном значении P_r .

4.3. Корреляционная функция высоты пламени

Для проведения измерений по установлению корреляции между безразмерной высотой пламени и соотношением уровней тепловой мощности, а также соотношением потоков импульса был подготовлен план эксперимента с использованием метода характеристических поверхностей [25, 26]. В качестве отклика рассматривалась безразмерная высота пламени.

Количество попыток рассчитывалось на основе количества конструктивных факторов и составило 16 (11 комбинаций и 5 повторений). Такой план обеспечивал наиболее точную

оценку параметров при минимальном количестве экспериментов. Использовался программный пакет Design Expert, специально предназначенный для разработки экспериментальных планов с применением различных методов планирования и построения наиболее точной модели, базирующейся на результатах спланированных экспериментов. Погрешность расчетных данных варьировалась от 0.1 до 4.5 % (в среднем 2 %). На рис. 6 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Видно хорошее их согласие. Полученная корреляция

$$H_r = a - bP_r + cMFR + dP_rMFR + eP_r^2 - fMFR^2 \quad (7)$$

была проверена для других областей пространства проектных параметров. Здесь $a = 1148.87012$, $b = 3061.481$, $c = 1.031$, $d = 0.36789$, $e = 1950.55740$ и $f = 2.63558 \cdot 10^{-4}$. Поскольку выражение (7) является квадратичным по P_r и MFR , зависимости от этих величин должны быть параболическими. Однако из рис. 3 видно, что высота пламени практически линейно меняется с ростом MFR . Это связано с тем, что последний коэффициент f в уравнении очень мал. Поэтому член $fMFR^2$ намного меньше, чем другие члены в уравнении, и им можно пренебречь. Таким образом, выражение (7) можно считать линейным по MFR и параболическим по P_r .

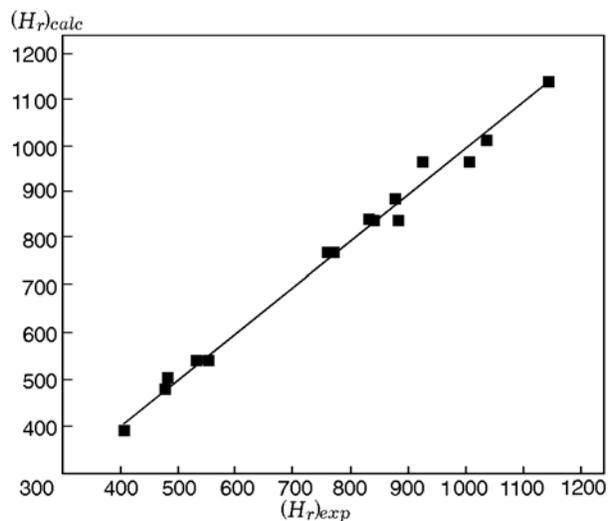


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных (точки) с результатами расчета по соотношению (7) (линия)

4.4. Бедный предел срыва пламени

Бедный предел срыва может быть определен как предельная скорость потока воздуха, при которой пламя еще может оставаться устойчивым при заданном расходе горючего. Эксперимент проводился следующим образом: при фиксированном расходе горючего постепенно увеличивался поток воздуха до тех пор, пока пламя не становилось неустойчивым и не срывалось. Момент перехода пламени из устойчивого состояния в неустойчивое, а также изменение высоты пламени при достижении скорости бедного предела срыва при различных расходах горючего определяли по видеозаписям.

Обнаружено, что высота пламени практически не изменяется при малых расходах горючего, однако при дальнейшем увеличении скорости потока горючего она резко повышается, что видно из рис. 7,а. Как упоминалось выше, при малых расходах горючего угол распыления струи увеличивается, а диаметр капель SMD уменьшается [23, 24] с ростом потока горючего. В результате эффективность рас-

пыления и смешивания быстро повышается и, несмотря на увеличение потока горючего, капли успевают сгореть в воздухе. Однако следует отметить, что при низких расходах горючего происходит лишь незначительный рост высоты пламени (см. рис. 7,а). По той же самой причине лишь небольшое количество мелких капель успевает пролететь через пламя и, сгорая, сформировать небольшую зону синего цвета в верхней части пламени, что иллюстрирует рис. 7,б. При более высоких расходах горючего в верхней части пламени видна большая зона синего цвета, что свидетельствует о том, что пламя расположено в области хорошего перемешивания и потому больше подвержено срыву. Из рис. 7,а видно, что высота пламени увеличивается с ростом расхода горючего. Увеличение высоты пламени и зоны синего цвета может быть связано с асимптотическим поведением среднего диаметра капель SMD и угла распыления струи при этих расходах горючего [23, 24], как уже упоминалось в п. 4.2. Соответственно, в результате повышения скорости потока горючего импульс капель увеличивается, что приводит к образованию мелкого аэрозоля. Таким образом, распыленное на большой угол горючее в виде мелкого аэрозоля способствует более эффективному перемешиванию паров горючего с воздухом и, таким образом, образованию в верхней части пламени зоны голубого цвета. Следует отметить, что зона пламени предварительно перемешанной смеси расширяется и потому предельная скорость срыва уменьшается.

Как видно из рис. 8, скорость потока воздуха на бедном пределе срыва (v_a) имеет параболическую зависимость от P_r : сначала она увеличивается с ростом расхода, а затем уменьшается. Низкий предел срыва пламени при малом расходе горючего обусловлен малой эффективностью распыления. Однако эффективность распыления улучшается с ростом расхода горючего и срыв пламени происходит при более высоком расходе воздуха, т. е. бедный предел срыва увеличивается. Тем не менее при определенном значении расхода горючего средний диаметр капель SMD и угол распыления струи практически не изменяются. Дальнейшее увеличение расхода горючего приводит к увеличению импульса капель, что позволяет им остаться несгоревшими после прохождения ядра пламени (см. рис. 7,б). Увеличение расхода воздуха в этой ситуации приводит к

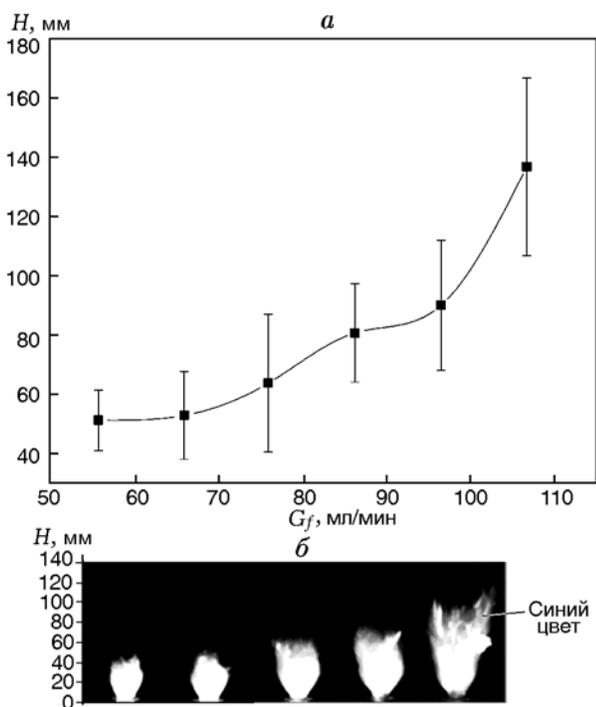


Рис. 7. Зависимость высоты пламени перед достижением значения скорости потока воздуха на бедном пределе срыва пламени от расхода горючего (а). Фотографии соответствующих пламен (б) при $G_f = 56, 76, 86, 97$ и 107 мл/мин (слева направо, масштаб $\approx 14.8 : 1$)

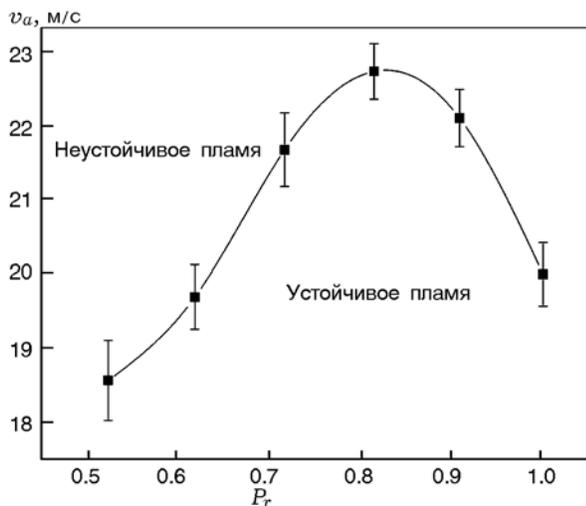


Рис. 8. Зависимость скорости потока воздуха на бедном пределе срыва пламени от расхода горючего

устранению зоны рециркуляции и в конечном итоге к срыву пламени. Поэтому при более высоких расходах горючего скорость на бедном пределе срыва пламени снижается за счет того, что капли не сгорают в ядре пламени. Средняя ошибка расчета бедного предела срыва пламени составила $\approx 4\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследовалось пламя распыленного керосина (Jet A1), а именно видимая высота пламени при различных значениях отношения моментов импульса MFR и расхода горючего. Методом оптимального планирования определена эмпирическая связь безразмерной высоты пламени с величиной MFR и соотношением уровней тепловой мощности, что может быть использовано для разработки систем, в которых применяется горение керосина. Исследован также бедный предел срыва пламени при различных расходах горючего. Полученные результаты экспериментов могут быть сформулированы следующим образом.

- Безразмерная высота пламени увеличивается с ростом MFR при постоянном расходе горючего. При увеличении соотношения уровней тепловой мощности высота пламени сначала уменьшается, достигая некоторого минимального значения, а затем увеличивается при любых фиксированных значениях MFR. Наблюдаемая зависимость высоты пламени от уровня тепловой мощности обусловлена более

эффективным распылением горючего и расширением области предварительно перемешанной горючей смеси за счет того, что капли, имеющие большой импульс, способны образовывать вторичную зону пламени предварительно перемешанной смеси над областью первичного диффузионного пламени.

- Получено эмпирическое соотношение (7) между высотой пламени, уровнем тепловой мощности и величиной MFR в безразмерной форме с помощью оптимального плана для поверхности отклика.

- Бедный предел срыва пламени имеет параболическую зависимость от расхода горючего. Сначала с ростом расхода горючего он увеличивается до некоторого максимального значения, при этом увеличивается эффективность распыления горючего; при дальнейшем повышении расхода горючего бедный предел срыва снижается. Эта параболическая связь обусловлена увеличением эффективности дробления капель горючего и расширением зоны пламени предварительно перемешанной смеси при увеличении потока горючего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chigier N. A., Roett M. F. Twin-fluid atomizer spray combustion // ASME Winter Annual Meeting, New York, 1972. — Paper N 79-WA/HT-25.
2. Onuma Y., Ogasawara M. Studies on the structure of a spray combustion flame // Fifteenth Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1975. — P. 453–465.
3. Mellor A. M. Workshop on Combustion Measurements in Jet Propulsion Systems. — Project SQUID, Purdue Univ., 1976.
4. Usowicz J. E. An experimental study of flame lengths and emissions of fully-modulated diffusion flames: M. Sc. Thesis / Worcester Polytechnic Inst. — 2011.
5. Becker H. A., Hang D. Visible length of vertical free turbulent diffusion flames // Combust. Flame. — 1978. — V. 32. — P. 115–137.
6. Blake T. R., McDonald M. An examination of flame length data from vertical turbulent diffusion flames // Combust. Flame. — 1993. — V. 94. — P. 426–432.
7. Blake T. R., Cote J. B. Mass entrainment, momentum flux, and length of buoyant turbulent gas diffusion flames // Combust. Flame. — 1999. — V. 117, iss. 3. — P. 589–599.
8. Bracco F. V. Nitric oxide formation in droplet diffusion flames // Fourteenth Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1973. — P. 831–842.

9. **Williams A.** Combustion of droplets of liquid fuels, a review // *Combust. Flame.* — 1973. — V. 21, N 132.
10. **Mellor A. M.** Simplified physical model of spray combustion in a gas turbine engine // *Combust. Sci. Technol.* — 1973. — V. 8. — P. 101–109.
11. **Aggarwal S. K., Sirignano W. A.** Ignition of fuel sprays deterministic calculations for idealized droplet arrays // *Twentieth Symp. (Intern.) on Combustion.* — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1984. — P. 1773–1780.
12. **Feikema D., Chen R. H., Driscoll J. F.** Enhancement of flame blowout limits by the use of swirl // *Combust. Flame.* — 1990. — V. 80. — P. 183–195.
13. **Feikema D., Chen R. H., Driscoll J. F.** Blowout of nonpremixed flames: Maximum coaxial air velocities achievable, with and without swirl // *Combust. Flame.* — 1991. — V. 86. — P. 347–358.
14. **Chen R. H., Driscoll J. F., Kelly J., Namazian M., Schefer R. W.** A comparison of bluff body and swirl stabilized flames // *Combust. Sci. Technol.* — 1990. — V. 71. — P. 197–217.
15. **Syred N., Beer J. M.** Combustion in swirling flows: A Review // *Combust. Flame.* — 1974. — V. 23. — P. 143–201.
16. **Beer J. M., Chigier N. A.** *Combustion Aerodynamics.* — London: Appl. Sci. Publ., 1972.
17. **Lefebvre A. H.** *Gas Turbine Combustion.* — 2nd Ed. — Taylor and Francis, 1998.
18. **Weiland N., Chen R. H., Strakey P.** Effects of coaxial air on nitrogen-diluted hydrogen jet diffusion flame length and NO_x emission // *Proc. Combust. Inst.* — 2011. — V. 33, iss. 2. — P. 2983–2989.
19. **Delichatsios M. A.** Transition from momentum to buoyancy-controlled turbulent jet diffusion flames and flame height relationships // *Combust. Flame.* — 1993. — V. 92. — P. 349–364.
20. **Shuen J. S.** Prediction of the structure of fuel sprays in cylindrical combustion chambers // *J. Propul. Power.* — 1987. — V. 3, N 2.
21. **Morcos V. H., Abdel-Rahim Y. M.** Parametric study of flame length characteristics in straight and swirl light-fuel oil burners // *Fuel.* — 1999. — V. 78. — P. 979–985.
22. **Nakamura M., Nishioka D., Hayashi J., Akamatsu F.** Soot formation, spray characteristics, and structure of jet spray flames under high pressure // *Combust. Flame.* — 2011. — V. 158. — P. 1615–1623.
23. **Reddy K. U., Mishra D. P.** Studies on spray behavior of a pressure swirl atomizer in transition regime // *J. Propul. Power.* — 2008. — V. 24, N 1.
24. **Chen S. K., Lefebvre A. H., Rollbuhler J.** Factors influencing the effective spray cone angle of pressure swirl atomizers // *J. of Eng. for Gas Turbines and Power.* — 1992. — V. 114. — P. 97–103.
25. **Abghari S. Z., Towfighi J., Karimzadeh R., Omidkhah M.** Application of response surface methodology in study of the product yield distribution of thermal cracking of atmospheric gasoil // *Scientia Iranica.* — V. 15, N 4. — P. 457–468.
26. **Davies L.** *Efficiency in Research Development, and Production: The Statistical Design and Analysis of Chemical Experiments.* — The Roy. Soc. Chem., 1993.
27. **Rajasimman M., Murugaiyan K.** Sorption of nickel by hypnea valentiae: Application of response surface methodology // *Intern. J. Civil Environ. Eng.* — 2011. — V. 3, N 1.

*Поступила в редакцию 21/І 2013 г.,
в окончательном варианте — 27/VI 2014 г.*