

01;03;12

О механизме аномально большой дальности "жесткого ламинарного факела"

© Г.А. Лукьянов, Гр.О. Ханларов

Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных,
С.-Петербург

Поступило в Редакцию 8 декабря 1997 г.

Дано объяснение эффекта аномально большой дальности одного из видов ламинарных факелов, получившего название "жесткого ламинарного факела". В рамках модели изобарической ламинарной струи с заданным объемным энерговыделением показано, что необычные свойства факела определяются его двухслойной структурой. Внешняя горячая оболочка обеспечивает стабилизацию течения в целом и создает условия для большой дальности приосевого потока холодной газовой смеси.

В работах [1,2] дано описание структуры, свойств и условий существования ранее неизвестного типа горячей ламинарной струи, названной автором "жестким ламинарным факелом" (ЖЛФ). Струйное течение этого типа обладает необычно большой устойчивостью и дальностью. Объяснение физической природы аномальных свойств ЖЛФ в литературе отсутствует. Ламинарный режим течения в ЖЛФ сохраняется до чисел Рейнольдса Re (определенных по параметрам на срезе сопла и диаметру сопла d) порядка $3 \cdot 10^4$. Длина факела достигает величины $(200-400)d$. ЖЛФ реализуется при истечении в воздух из круглого сопла ($d = 2-4$ mm) смеси горючего (природного) газа и воздуха при коэффициенте избытка воздуха $0.2 < n \leq 0.6$ и расположении поджигающего устройства вблизи сопла ($x/d < 3$). Диаметр ЖЛФ на расстоянии 150 mm от сопла составляет $(1.5-4)d$ в зависимости от n и расхода газа. В узкой приосевой зоне протяженностью $L \approx (60-80)d$ температура, состав газа и динамическое давление остаются практически неизменными. Толщина горячей оболочки, окружающей холодную приосевую зону, составляет 0.4-1 mm.

В газовых струях (без горения) ламинарный режим течения на срезе сопла сохраняется при числах $Re_* \leq 2300$, а область ламинарного режима в струе (до сечения перехода к турбулентному режиму) имеет протяженность l , определяемую числом $Re_l = \rho u_m l / \mu = 2 \cdot 10^4$, где ρ — плотность, u_m — скорость на оси струи в сечении перехода, μ — вязкость [3]. Дальностью ламинарных струй L (расстояние от сопла, на котором осевая скорость u или динамическое давление $p_D = \rho u^2 / 2$ падают до определенного значения, например, $u/u_0 = 0.9$ или $p_D/p_{D_0} = 0.9$) пропорциональна числу Re , однако ее величина ограничена сверху условием $L < l$. Максимальная дальность $L_{0.9}$ ламинарных струй не превышает $(10-20)d$ [3].

Течение в ламинарном факеле (горящей струе) существенно отличается от течения в изотермических и горячих газовых струях без горения. Это различие определяется их разной гидродинамической структурой. В факеле, в отличие от инертной струи, имеются две четко выраженные области течения — приосевая зона течения холодного газа и периферийная зона течения нагретого газа, разделенные относительно тонкой зоной горения.

Нагрев газа в зоне горения, снижение плотности и увеличение вязкости газа, сопровождающие нагрев, приводят к резкому увеличению роли сил вязкости (уменьшению эффективного числа Re). Поэтому, в отличие от струйного течения инертного газа, в ламинарном факеле число Re на срезе сопла не является параметром, определяющим режим течения в струе. Переход от ламинарного режима течения к турбулентному в факелах происходит при заметно больших числах Re_* . Согласно [4], для газовоздушных факелов число $Re_* = (3-9) \cdot 10^3$. Данные [1,2] для ЖЛФ расширяют этот диапазон до чисел $Re_* \leq 3 \cdot 10^4$.

По нашему мнению, природа высокой устойчивости течений во всех разновидностях ламинарных факелов, включая ЖЛФ, одинакова и сводится к стабилизирующей роли более вязкой и менее плотной кольцевой области горячего газа. Необычные свойства ЖЛФ объясняются особенностями смешения и энерговыделения в факеле частично перемешанных газов при $0.2 < n \leq 0.6$, приводящими к формированию необычно протяженной кольцевой области горения при сохранении приосевого течения более плотного и менее вязкого холодного газа. Двухслойная структура течения с существенно различным отношением сил инерции к силам вязкости во внешнем и внутреннем слоях приводит одновременно к сохранению ламинарного режима и увеличению дальности приосевого течения.

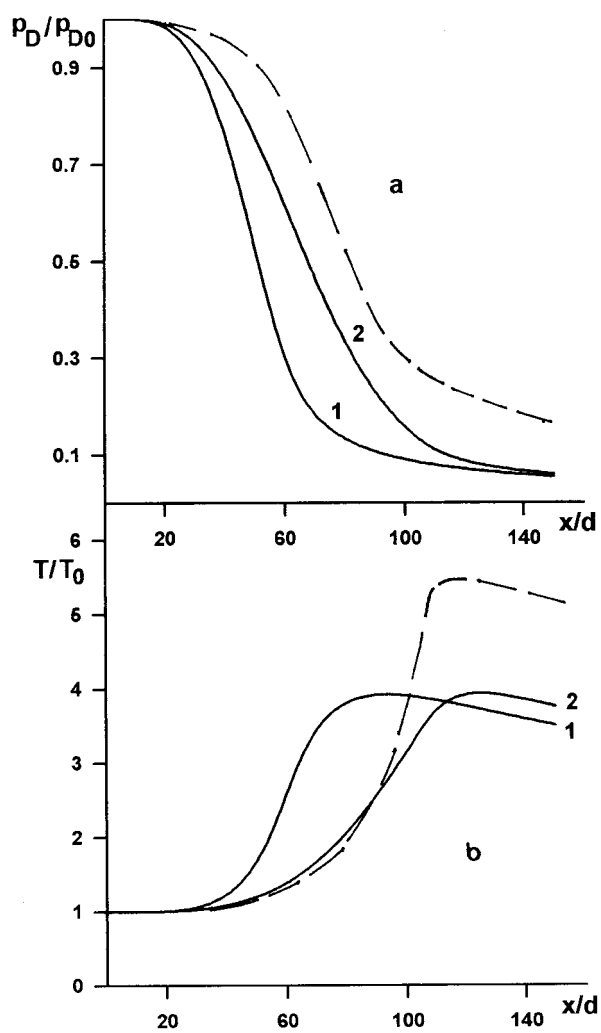


Рис. 1. Изменение динамического давления p_D (a) и температуры T (b) вдоль оси ламинарного факела. Пунктирные линии — эксперимент [2], сплошные — расчет для струйной модели с заданным энерговыделением в цилиндрическом слое длиной $x/d = 50$ (1) и 100 (2).

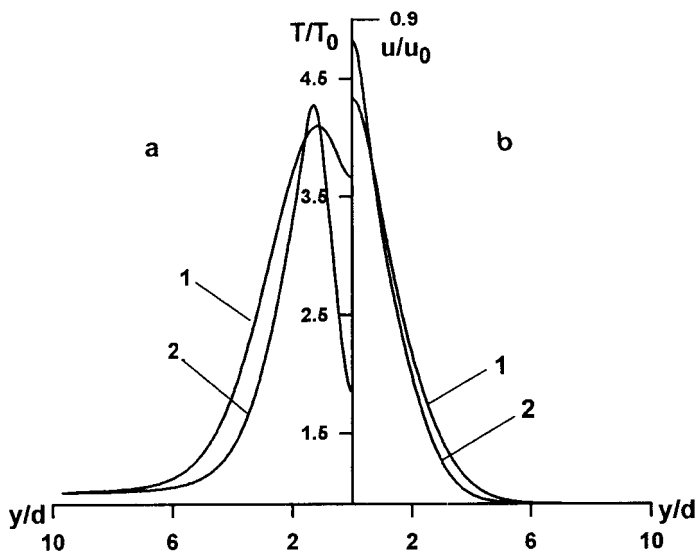


Рис. 2. Распределения температуры T (а) и скорости u (б) в поперечном сечении ($x/d = 75$) струйной модели факела. Обозначения см. на рис. 1.

Определяющая роль двухслойного характера течения ЖЛФ в механизме его аномально высокой дальности подтверждается результатами математического моделирования. Для описания течения в факеле использована модель изобарической ламинарной струи с заданным законом объемного энерговыделения. Геометрия области и параметры энерговыделения приближенно моделируют тепловой эффект горения. Такая модель носит безусловно приближенный характер, однако позволяет рассмотреть задачу о влиянии энерговыделения на течение в струе с самых общих позиций.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные [2] (пунктир) об изменении вдоль оси ЖЛФ величины динамического давления p_D (а) и температуры T (б), а также аналогичные результаты приближенного моделирования факела струей с заданным равномерным энерговыделением в цилиндрическом слое толщиной $y/d \in [1; 1.5]$ и длиной $x/d \in [0; 50]$ (1) и $x/d \in [0; 100]$ (2), x и y — продольная и попе-

речная координаты. Экспериментальные данные соответствуют расходу газозвушной смеси, равному $8.35 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 0.6$ при $d = 4 \text{ mm}$. Эксперимент и расчеты выполнены при числе $Re = \rho_0 u_0 d / \mu_0 = 2000$, $T_0/T_e = 1$ (T_0 и T_e — температура на срезе сопла и в окружающей среде). В модельных расчетах общее энерговыделение в струе за единицу времени, отнесенное к потоку энтальпии на срезе сопла, принято равным аналогичному отношению теплового эффекта сгорания горючего газа в эксперименте [2]. На рис. 2 для модели факела (1 и 2) представлены поперечные профили $T(a)$ и $u(b)$ в сечении $x/d = 75$. Увеличение области энерговыделения приводит к увеличению дальности и протяженности (вдоль оси x) холодного ядра факела. Результаты приближенного моделирования качественно хорошо согласуются с данными экспериментов. Аномально большая дальность ЖЛФ, действительно, определяется двухслойной структурой. Внешняя горячая оболочка обеспечивает стабилизацию течения в целом и создает условия для высокой дальности приосевого потока холодной газовой смеси. Механизм данного явления представляет большой интерес как способ управления струйными и иными течениями с объемным подводом энергии (течения с электрическими разрядами, поглощением лазерного излучения и др.).

Авторы признательны М.Х. Стрельцу за помощь в выборе математической модели и численной схемы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 97–01–00235).

Список литературы

- [1] Цыганков Г.Т. // ФГВ. 1990. № 6. С. 78–83.
- [2] Цыганков Г.Т. // ФГВ. 1991. № 3. С. 54–58.
- [3] Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов И.П., Смирнова И.П. Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с.
- [4] Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Мир, 1968. 592 с.