

ФОРМИРОВАНИЕ И ГОРЕНИЕ ВЕЕРНЫХ СТРУЙ ГАЗОВ

А. П. Чугуев, А. Н. Кухто, В. И. Макеев

(Балашиха)

Обеспечение безопасности современных промышленных объектов и предотвращение загрязнения окружающей среды при проведении технологических операций по сбросу (дренажу) газов на объектах нефтехимии, криогенной техники и т. п. достигается применением разнообразных дренажных устройств. Вертикально установленная круглая труба, по которой газ отводится на нужную высоту, где происходит его рассеивание или сжигание, — широко распространенное в настоящее время устройство. Его недостаток — существование значительных размеров пламен или зон опасных концентраций при сбросе газов [1].

Эффективность сброса может быть существенно повышена применением веерных струй [2]. Однако экспериментально обоснованные данные для расчета параметров таких струй и размеров пламен отсутствуют, хотя теоретические исследования их газодинамических параметров проводились в [3, 4].

Рассмотрим турбулентную веерную струю. Пусть газ плотностью ρ_0 и скоростью u_0 вытекает в радиальном направлении x из кольцевой щели шириной δ по окружности радиусом R_0 . При течении струи он смешивается с окружающим газом плотностью ρ_a , что приводит к изменению в струе скорости u , расхода G , плотности ρ , ширины струи y_B и концентрации исходного газа c . С учетом усредненных значений всех величин в данном сечении x , а также отсутствия влияния подъемных сил можно записать уравнения сохранения импульса и массы

$$\rho u^2 (x + R_0) y_B = \rho_0 u_0^2 R_0 \delta, \quad (1)$$

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d[\rho u (x + R_0) y_B]}{dx} = 2k\rho (x + R_0), \quad (2)$$

где $k = \frac{dy_B}{dx}$ — эмпирическая константа.

Преобразование выражения (2) с учетом (1) и связи расхода с объемной концентрацией газа при условии сохранения объемных расходов по сечению струи дает дифференциальное уравнение, решение которого позволяет получить изменение концентрации газа вдоль радиуса веерной струи:

$$c = \left[1 + 2k \frac{\rho_0}{\rho_a} \frac{x^2 + 2R_0 x}{R_0 \delta} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Исследование уравнений (1) — (3) с учетом изменения k показывает, что зависимость объемной концентрации газа в струе от обобщающей координаты $\xi = (x^2 + 2R_0 x)/R_0 \delta$ и отношения плотностей $\bar{\rho}_a = \rho_a/\rho_0$ имеет более сложный вид, чем выражение (3), и аппроксимируется степенной функцией с показателем степени меньше 1/2.

С целью апробации полученной теоретической зависимости (3) и уточнения показателя степени этой степенной функции проведены эксперименты по зондированию веерной струи и определению размеров веерного пламени. Экспериментальная установка включала устройство сброса, систему пробоотбора и газового анализа, состоящую из специально разработанного шприца с водяным поршнем и иглой (диаметром 1 и толщиной стенки 0,1 мм), хроматографа «Цвет 100», кинокамеры «Конвас-КСР-1М».

Опыты проводились на устройстве, выполненном в соответствии с [2], с диаметрами кольцевых щелей 80—160 и шириной щелей 0,5—4,0 мм. Расход газа выбирался так, чтобы обеспечивалось отсутствие

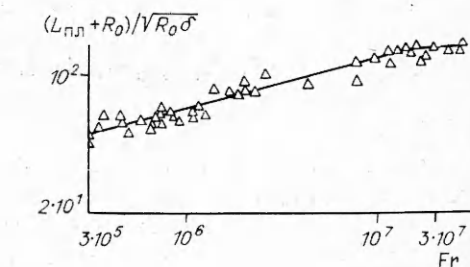
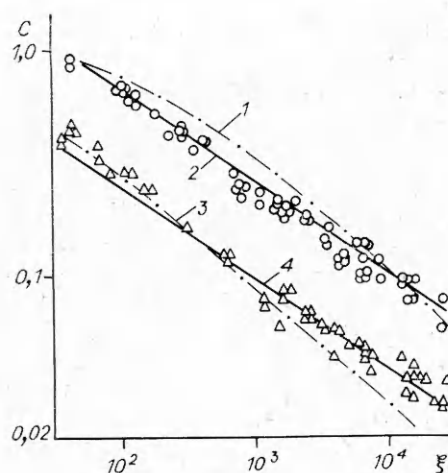


Рис. 2. Зависимость $(L_{пл} + R_0) / \sqrt{R_0 \delta}$ от Fr .

Рис. 1. Изменение концентраций водорода и избыточного азота вдоль оси веерной струи в зависимости от параметра ξ .

1, 3 — по соотношению (3) при $k = 0,06$; 2, 4 — по соотношению (4); точки — эксперимент (Δ — азот, $\circ$ — водород).

влияния подъемной силы на формирующуюся струю. Он подсчитывался по падению давления в баллонах известного объема за заданный промежуток времени. Размеры пламени оценивались по результатам киносъемки.

На рис. 1 приведены измеренные значения концентраций водорода и избыточной концентрации азота в плоскости симметрии веерной струи. Видно, что экспериментальные данные для различных размеров радиальной щели хорошо обобщаются в координатах c, ξ . Наклон кривых 1, 3 несколько больший, чем у полос экспериментальных точек. Сравнение данных для водорода и азота указывает на более слабую, чем в (3), зависимость концентраций также и от ρ_a .

Кривые 2, 4, построенные по выражению

$$c = 1,5 (\rho_a / \xi)^{0,4}, \quad (4)$$

наилучшим образом описывают экспериментальные данные. Предложенное уравнение (4) дает простую зависимость концентрации как от плотности вдуваемого газа, так и расстояния до радиальной щели. По (4) легко вычислить расстояние, на котором достигается определенная концентрация, размеры опасных зон при веерном сбросе газов. Эта процедура заметно упрощается при $\xi \gg R_0 / \delta$, так как в этом случае $\xi \simeq (x + R_0)^2 / R_0 \delta$, тогда из (4) получим

$$x + R_0 \simeq \sqrt{\rho_a R_0 \delta} (1,5/c)^{1,25}. \quad (5)$$

По аналогии с (5) для максимальных длин пламен будет справедливо соотношение $(L_{пл} + R_0) / \sqrt{R_0 \delta} = \text{const}$.

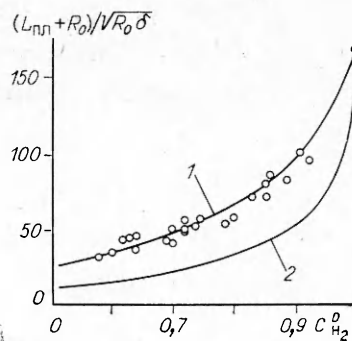
На рис. 2 приведены экспериментальные данные, показывающие зависимость безразмерной длины веерного пламени водорода $(L_{пл} + R_0) / \sqrt{R_0 \delta}$ от числа Фруда $Fr = u_0^2 / g \sqrt{R_0 \delta}$, где $\sqrt{R_0 \delta}$ — характерный размер кольцевой щели. При $Fr \geq 2 \times 10^7$ безразмерная длина пламени достигает предельного и постоянного значения, равного 170. Следует отметить, что предельная безразмерная длина пламени водорода для цилиндрических труб $L/d \simeq 250$ [1] и достигается при $Fr \geq 10^7$. С учетом приведенных данных максимальная длина (в м) веерного пламени водорода может быть вычислена по выражению

$$L_{пл} + R_0 \simeq 170 \sqrt{R_0 \delta}. \quad (6)$$

Сравнение максимальных размеров цилиндрических и веерных пламен водорода (посредством выражения размера щели через эквивалентный диаметр и использования (6) и предельного соотношения для круглых труб) показывает, что длина веерного пламени более чем в

Рис. 3. Зависимость относительной длины веерного пламени водорода от степени разбавления инертным газом (по соотношению (7)).

1 — при разбавлении азотом (точки — эксперимент); 2 — при разбавлении хладоном 13В1.



4 раза меньше цилиндрического. Аналогичное уменьшение размеров наблюдается при сравнении зон загазованности.

Предложенная зависимость (5) может быть использована для расчета распределения концентраций в веерной струе горючего газа, например водорода, разбавленного инертным газом. При этом c в (5) будет означать c_{H_2} , отнесенную к мольной доле $c_{H_2}^0$ на срезе радиальной щели, а $\bar{\rho}_a^*$ — отношение плотностей окружающей среды (воздуха) и выбрасываемой смеси.

Длина веерного пламени водорода, разбавленного инертным газом, с учетом (5) и (6) может быть вычислена по уравнению

$$L_{пл}^* + R_0 \simeq 44 (c_{H_2}^0)^{1,25} \sqrt{\bar{\rho}_a^* R_0 \delta}. \quad (7)$$

Корректность предложенных зависимостей (6) и (7) подтверждена экспериментально при изучении размера веерного пламени водорода, разбавленного азотом. Из рис. 3 видно, что опытные данные повторяют ход расчетной зависимости (7), показывая хорошее совпадение с экспериментом.

Следует отметить, что применение тяжелых инертных разбавителей типа паров хладонов (12В1 или 13В1) приводит к более заметному сокращению длины пламени. Например (см. рис. 3, 2), уже при 5 %-ном разбавлении водорода хладоном длина пламени сокращается в 2 раза, так как при этом значительно уменьшается $\bar{\rho}_a^*$.

Таким образом, в работе проведены теоретические и экспериментальные исследования, позволившие найти связь распределения концентраций газов в веерной струе с геометрическими размерами кольцевой щели и отношением плотностей окружающей среды и сбрасываемого газа, и предложить простые аналитические зависимости для оценки размеров формирующихся опасных зон и пламен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басев В. К., Ясаков В. А. ФГВ, 1974, 10, 4, 485.
2. А. с. 877244 СССР, БИ, 1981, 40.
3. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. — М.: Машиностроение, 1969.
4. Абрамович Г. Н., Смирнова И. П. Изв. АН СССР. МЖГ, 1967, 1, 7.
5. Ching-Yen Chen, Rodi W. 6-th Intern. Heat Transfer Conference. Vol. 1. — Toronto, 1978.

Поступила в редакцию 24/III 1987,
после доработки — 5/I 1988