

Ю.П. Ключка, к.т.н., ст. науч. сотр., УГЗУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОГО РАССТОЯНИЯ В СТРУЕ ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА

(представлено доктором техн. наук В.И. Кривцовой)

Получено аналитическое выражение для определения расстояния в струе водорода от точки истечения до точки с пожаровзрывоопасной концентрацией, показано влияние начального участка струи и коэффициента подмешивания на величину расстояния. Построена номограмма для определения расстояния в струе водорода до точки с заданной концентрацией.

Постановка проблемы. При эксплуатации систем с водородом, независимо от способа его хранения возможны выбросы водорода. Для оценки степени опасности таких выбросов необходимо знать размеры возможной зоны загазованности, а также размеры факела пламени при воспламенении струи водорода.

Анализ последних достижений и публикаций. К проблеме взрывоопасности водородных систем относятся плановые и аварийные газосбросы. Места расположения газосбросных устройств и их высота выбираются с таким расчетом, чтобы при заданных расходах газа и геометрических характеристиках магистрали обеспечивались условия, при которых опасная зона струи сбрасываемого газа не достигала зданий и сооружений, мест размещения обслуживающего персонала и мест расположения воздухозаборных устройств вентиляционных и других систем.

Один из вариантов выброса водорода является его истечение из газосбросной магистрали. При этом опасной зоной считается зона по горизонтали и вертикали вокруг среза газосбросной трубы, внутри которой концентрация водорода в воздухе составляет 4 % и более [1, 2].

В работе [3] приведена упрощенная схема расчета вертикальной турбулентной осесимметричной струи водорода в воздухе (изотермический случай) с учетом действия архимедовой силы и привлечением лишь одного эмпирического коэффициента. Предполагается, что изменения концентрации поперек струи нет, а концентрация изменяется только от сечения к сечению вдоль направления потока. На рис. 1 приведена схема струи водорода для расчета по упрощенной схеме.

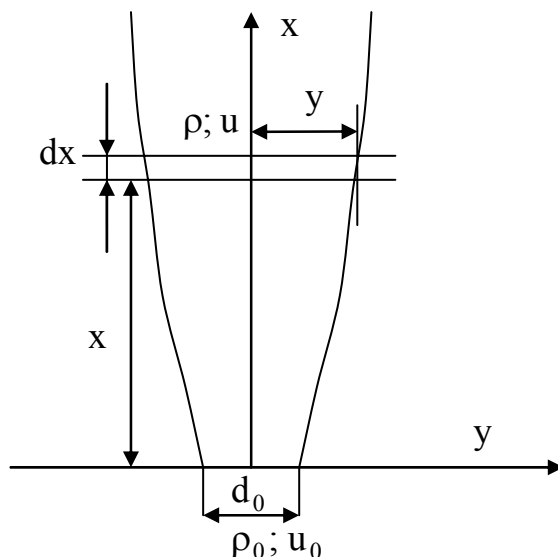


Рисунок 1 - Схема струи водорода

В соответствии с рис. 1 в работе [3] для описания истечения водорода используются следующие исходные уравнения:

– уравнение баланса количества движения, в котором приращение количества движения от сечения с координатой x до сечения $x+dx$ равно подъемной силе, действующей на элементарный диск струи толщиной dx

$$d(\rho c u^2 y^2) = \rho g (c_a - c) y^2 dx ; \quad (1)$$

– уравнение изменения массового расхода от сечения к сечению за счет подмешивания окружающего воздуха через боковую поверхность диска с радиусом y и толщиной $2\pi y dx$

$$d(\rho c u y^2) = 2k \sqrt{\frac{\rho}{\rho_a}} \rho c_a y u dx ; \quad (2)$$

где k - эмпирический коэффициент подмешивания, $k = 0,05625$ [3]; y - поперечная координата; u - скорость в произвольном сечении струи, м/с; ρ - плотность в произвольном сечении струи, кг/м³; ρ_a - плотность воздуха, кг/м³; g - ускорение силы тяжести, м/с²; c - концентрация водорода, об. доли; p - давление в произвольном сечении струи, МПа.

В результате преобразований в работе [3] была получена зависимость, связывающая относительное расстояние от точки истечения до точки с концентрацией c по оси x и параметры истечения водорода

$$\int_1^{G^*} \frac{dG^*}{\left[G^{*2} - \left(1 - \frac{4}{5B}\right)\right]^{1/5}} = 4k\sqrt{c_a^*} \left(\frac{5B}{4}\right)^{1/5} x^*, \quad (3)$$

где $B = \frac{1}{4k\sqrt{c_a^*}} \frac{c_a^* - 1}{Fr}$; $G^* = 1 + c_a^* \left(\frac{1}{c} - 1\right)$; $c_a^* = \rho_a^* = \rho_a / \rho_0$; Fr – число Фруда, $Fr = u_0^2 / gd_0$; $x^* = x / d_0$.

Дальнейшее решение выражения (3) в работе [3] сводилось к введению допущений и решению интеграла численным методом.

Постановка задачи и ее решение. Для оценки размеров опасной зоны вдоль оси истечения водорода необходимо определить расстояние от точки истечения до точки с пожаровзрывоопасной концентрацией, определить параметры, влияющие на величину расстояния, а также характер их воздействия.

Для решения этой задачи проинтегрируем левую часть выражения (3) по G^* , в результате чего получим зависимость относительного расстояния по оси x до точки с концентрацией c

$$x^* = - \frac{0,434 \cdot \text{hypergeom} \left([0,2; 0,5], [1,5], \frac{-5(c_a^* - 1)}{-5c_a^* + 5 + 16k\sqrt{c_a^*} Fr} \right)}{\left(\frac{-5c_a^* + 5 + 16k\sqrt{c_a^*} Fr}{k\sqrt{c_a^*} Fr} \right)^{1/5} k\sqrt{c_a^*}} + \frac{0,434 \cdot \text{hypergeom} \left([0,2; 0,5], [1,5], \frac{-5 \left(1 + c_a^* \left(\frac{1}{c} - 1\right)\right)^2 (c_a^* - 1)}{-5c_a^* + 5 + 16k\sqrt{c_a^*} Fr} \right)}{\left(1 + c_a^* \left(\frac{1}{c} - 1\right)\right)^{-1} \cdot \left(\frac{-5c_a^* + 5 + 16k\sqrt{c_a^*} Fr}{k\sqrt{c_a^*} Fr} \right)^{1/5} k\sqrt{c_a^*}}, \quad (4)$$

где $\text{hypergeom}([n_1; n_2; \dots], [m_1; m_2; \dots], z)$ – гипергеометрическая функция Бернса, то есть

$$\begin{aligned} & \text{hypergeom}([n_1; n_2; \dots], [m_1; m_2; \dots], z) = \\ & = \sum_{k=0}^{\infty} z^k \frac{1}{k!} \frac{\Gamma(n_1 + k)\Gamma(n_2 + k) \dots \Gamma(m_1 + k)\Gamma(m_2 + k) \dots}{\Gamma(n_1)\Gamma(n_2) \dots \Gamma(m_1)\Gamma(m_2) \dots}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $(n_i; m_i; z) \in (-\infty; +\infty)$.

Учитывая то, что $c_a^* = \rho_a^* = \rho_a / \rho_0 = 29/2 = 14,5$ и $k = 0,05625$ [3], выражение (4) принимает следующий вид

$$x^* = -0,886 \frac{\text{hypergeom}\left([0,2; 0,5], [1,5], \frac{-67,5}{-67,5 + 3,427 \cdot \text{Fr}}\right)}{(-5 + 0,2538 \cdot \text{Fr})^{1/5} \cdot \text{Fr}^{-1/5}} + \left(-13,5 + \frac{14,5}{c}\right) \text{hypergeom}\left([0,2; 0,5], [1,5], \frac{-67,5 \cdot \left(-13,5 + \frac{14,5}{c}\right)^2}{-67,5 + 3,427 \cdot \text{Fr}}\right) \cdot (6) + 0,886 \frac{1}{(-5 + 0,2538 \cdot \text{Fr})^{1/5} \cdot \text{Fr}^{-1/5}}$$

В соответствии с (6) на рис. 2 представлена зависимость относительного расстояния в струе водорода до точки с концентрацией c от числа Фруда и концентрации.

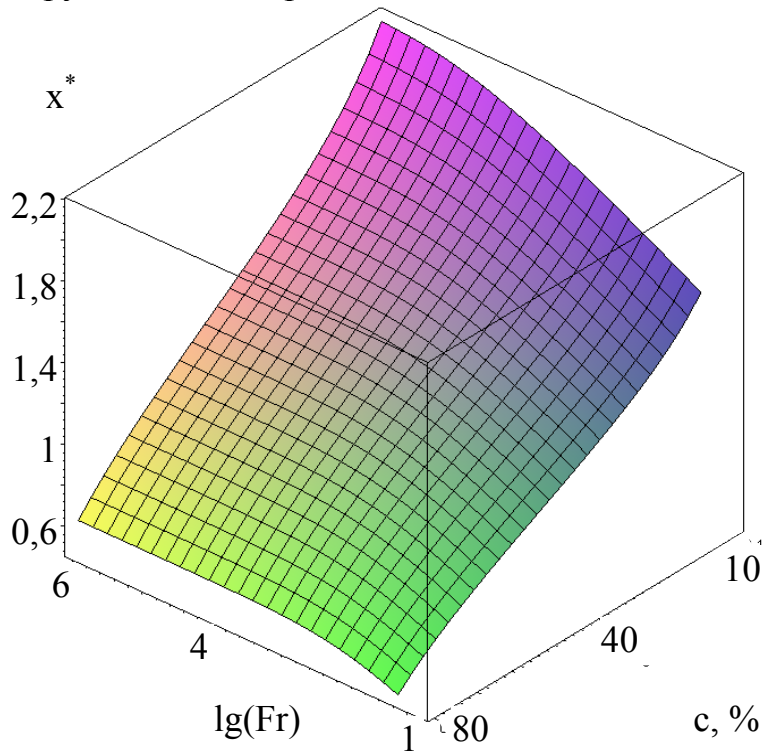


Рисунок 2 – Зависимость x^* от числа Фруда и концентрации

Анализ рис. 2 показывает, что увеличение концентрации во всех случаях влечет за собой увеличение x^* , в то время как увеличение числа Фруда не всегда влечет за собой рост x^* .

В работе [3] было показано, что небольшое расхождение расчета с экспериментом вызвано тем, что турбулентная струя имеет

вблизи выхода так называемый начальный участок [3], в котором концентрация по оси струи не меняется, а его длина x_n составляет примерно (4-5) и уменьшается с уменьшением числа Фруда по зависимости

$$x_{n(Fr)} = x_n - 6,3 \cdot Fr^{-0,2}. \quad (7)$$

Также было установлено, что коэффициент подмешивания увеличивается с уменьшением числа Фруда по зависимости [3]

$$k_{(Fr)} = k(1 + Fr^{-0,2}). \quad (8)$$

Тогда с учетом (7) и (8) выражение (6) принимает следующий вид

$$x_m^* = \left[\frac{\text{hypergeom} \left[0,2; 0,5 \right], [1,5], \frac{-67,5 \cdot Fr^{-1}}{-67,5 + 60,9 \left(0,05625 + \frac{0,05625}{Fr^2} \right)}}{0,0886^{-1} \cdot \left(-5 + 4,51 \left(0,05625 + \frac{0,05625}{Fr^2} \right) \cdot Fr \right)^{1/5}} + \frac{\text{hypergeom} \left[0,2; 0,5 \right], [1,5], \frac{-67,5 \left(-13,5 + \frac{14,5}{c} \right)^2 \cdot Fr^{-1}}{-67,5 + 60,9 \left(0,05625 + \frac{0,05625}{Fr^2} \right)}}{0,0886^{-1} \cdot \left(-13,5 + \frac{14,5}{c} \right)^{-1} \cdot \left(-5 + 4,51 \left(0,05625 + \frac{0,05625}{Fr^2} \right) \cdot Fr \right)^{1/5}} \right] \cdot (9)$$

$$\cdot \left[\left(0,05625 + \frac{0,05625}{Fr^2} \right) \left(\frac{1}{\left(0,05625 + \frac{0,05625}{Fr^2} \right) Fr} \right)^{1/5} \right]^{-1} + 4,5 - 6,3 \cdot Fr^{-0,2}$$

На рис. 3 приведены графические зависимости (6) и (9), а на рис. 4 – $x_{n(Fr)}$ и $(x_m^* - x^*)$.

Анализ рис. 3 показывает, что при значениях концентрации и числа Фруда, которые принадлежат области справа от кривой N (рис. 3) и слева от кривой M (рис. 4), значение относительного расстояния уменьшается на несколько единиц (максимум на $9d_0$ - рис. 4). В дру-

гих случаях значение относительного расстояния увеличивается на максимум на $4d_0$. Также из рис. 4 следует, что при высоких значениях концентрации и числа Фруда увеличение x_m^* по отношению к x^* происходит в основном за счет учета $x_{n(Fr)}$.

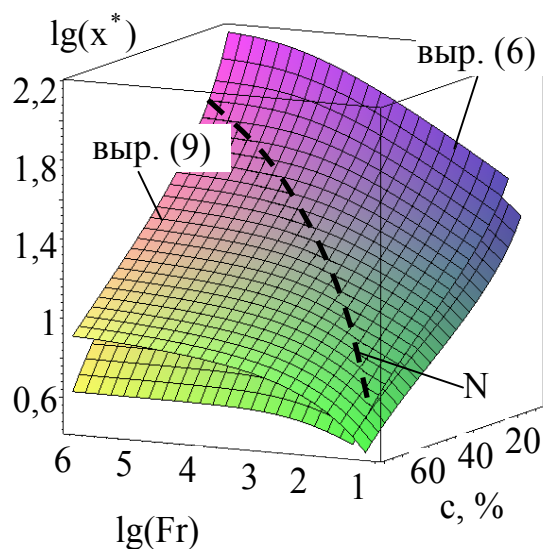


Рисунок 3 - Зависимость x_m^* и x^* от числа Фруда и концентрации водорода в струе

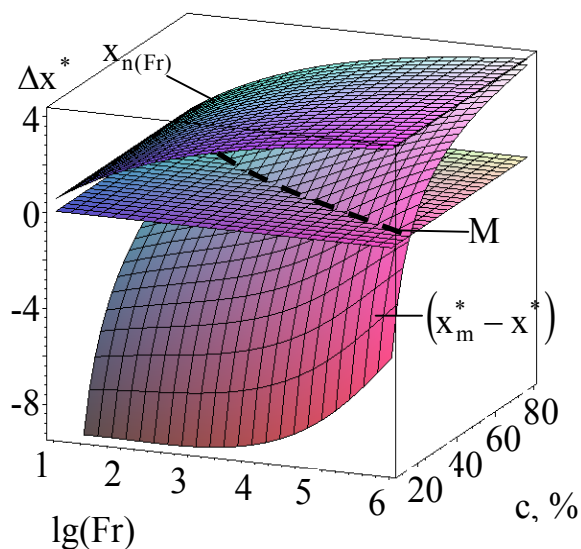


Рисунок 4 - Зависимость $(x_m^* - x^*)$ и $X_{n(Fr)}$ от числа Фруда и концентрации водорода в струе

Целесообразно посмотреть, как скорость истечения и диаметр выходного отверстия влияет на безопасное расстояние. На рис. 5 приведены скорости изменения относительного расстояния (частные производные x_m^*).

Из рис.5а следует, что наибольшая скорость приращения x_m^* наблюдается при высоких значениях концентрации, причем с ростом числа Фруда скорость сначала увеличивается, а потом уменьшается практически до начального состояния. Из рис. 5б следует, что скорость уменьшения x_m^* при увеличении c уменьшается, при этом зависимость $\frac{\partial(x_m^*)}{\partial(c)}$ от концентрации при больших значениях Fr по своему внешнему виду приближается к гиперболе.

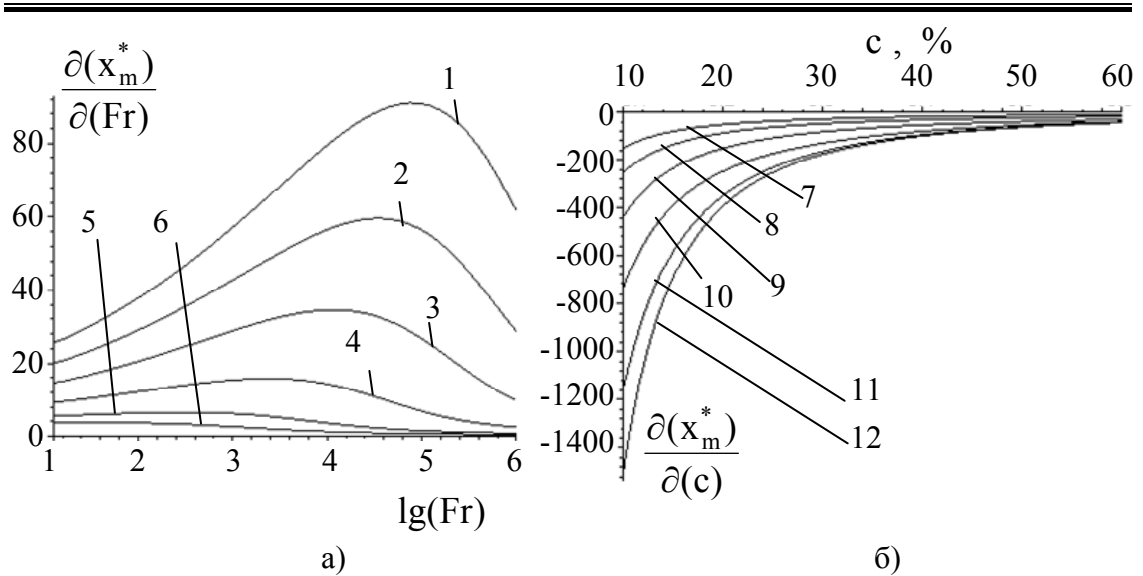


Рисунок 5 – Скорость изменения x_m^* : а – $\frac{\partial(x_m^*)}{\partial(Fr)}$; б – $\frac{\partial(x_m^*)}{\partial(c)}$; 1 – $c=4$ %; 2 – $c=6$ %; 3 – $c=10$ %; 4 – $c=20$ %; 5 – $c=40$ %; 6 – $c=60$ %; 7 – $Fr=12,5$; 8 – $Fr=100$; 9 – $Fr=1000$; 10 – $Fr=10000$; 11 – $Fr=100000$; 12 – $Fr=1000000$

На рис. 6 в соответствии с выр. (9) и тем, что $u_0 = \sqrt{Fr \cdot gd_0}$ приведено номограмму определения x_m^* в зависимости от U и d_0 .

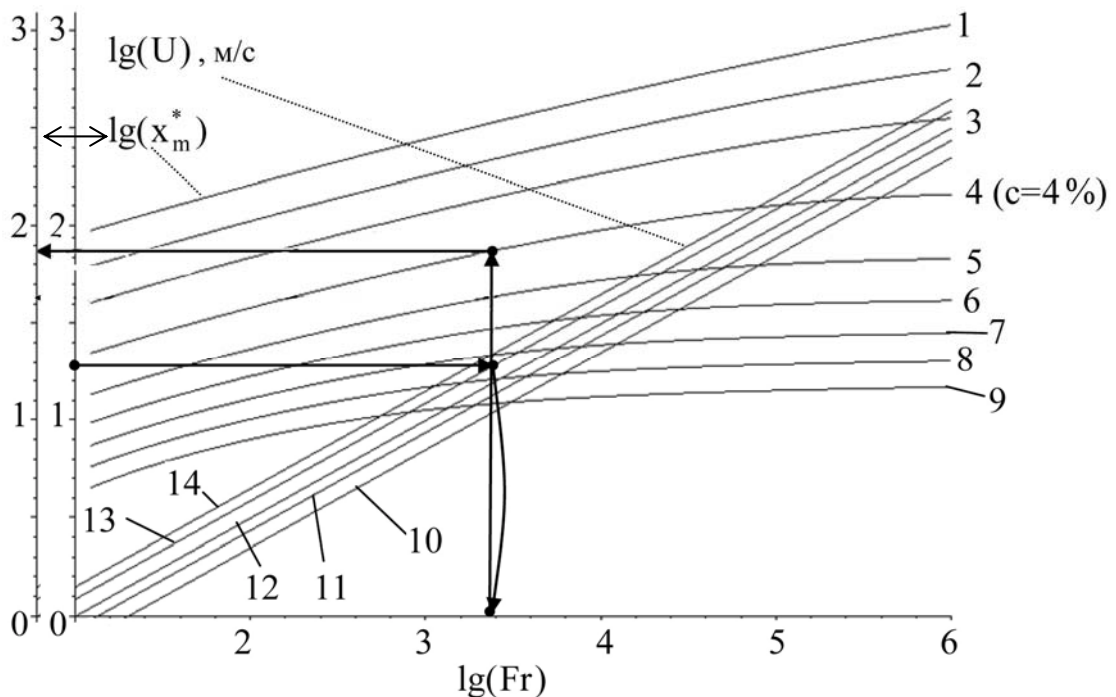


Рисунок 6 – Номограмма определения x_m^* в зависимости от U и d_0 : 1 – $c=1$ %; 2 – $c=2$ %; 3 – $c=4$ %; 4 – $c=10$ %; 5 – $c=20$ %; 6 – $c=30$ %; 7 – $c=40$ %; 8 – $c=50$ %; 9 – $c=60$ %; 10 – $d_0=0,005$ м; 11 – $d_0=0,0075$ м; 12 – $d_0=0,01$ м; 13 – $d_0=0,015$ м; 14 – $d_0=0,02$ м

Выводы: В результате проведенной работы:

– получено аналитическое выражения для определения расстояния в струе водорода от точки истечения до точки с заданной концентрацией;

– рассмотрено влияние таких параметров как c , U и d_0 на скорость изменения x_m^* ;

– построена номограмма для определения расстояния в струе водорода от точки истечения до точки с заданной концентрацией в зависимости от U и d_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесчастнов М. В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991 г. – 231 с.

2. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение: Справочное издание / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовнин и др.: под ред. Д.Ю. Гамбурга, И.Ф. Дубовнина, - М.:Химия, 1989. – 672 с.

3. Шевяков Г. Г., Савельева Н. И. Распространение и горение струи водорода в открытой атмосфере. // Альтернативная энергетика и экология. 2004. № 1. С. 23–27.

4. Домашенко А.М. Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты. // Альтернативная энергетика и экология. 2006. № 11. С. 28–38.

5. Филин Н. В., Комов В. Ф., Кондрашков Ю. А., Шевяков Г.Г. Некоторые вопросы безопасности при хранении водорода и работа с ним. М: Цинтихимнефтемаш, 1971, № 5. С. 14–17.
nuczu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.