

Купцов А.И., Гимранов Ф.М.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО ВЫБРОСА ОПАСНОГО ГАЗА СО СВЕЧИ РАССЕЙВАНИЯ

**Ключевые слова:** свеча рассеивания, предельно допустимый выброс, математическое моделирование.

Большее значение для обеспечения экологической безопасности на предприятиях газовой, нефтяной и нефтехимической отраслей имеет прогнозирование последствий залповых выбросов опасных газов. Предложенная методика определения предельно допустимого выброса опасного газа со свечи рассеивания позволяет установить массовый расход выбросов, при котором не возникают приземные концентрации, превышающие допустимые концентрации для работников предприятий, населения и окружающей среды.

**Keywords:** stack of dissipation, maximum permissible ejection, mathematical modeling.

The greater importance for ensuring environmental safety at the enterprises of the gas, oil and petrochemical industries is predicting the consequences of volley emissions of hazardous gases. The proposed methodology for determining the maximum allowable emission of a hazardous gas from a stack of dissipation allows the establishment of a mass discharge of emissions in which surface concentrations do not arise that exceed the maximum allowable concentrations for workers in enterprises, the population and the environment.

### Введение

Технологическая операция вынужденного освобождения аппаратов, емкостного оборудования и трубопроводов на химических, нефтехимических и газоперерабатывающих производствах осуществляется, в том числе, путем выброса газов через свечи рассеивания непосредственно в атмосферу.

В настоящее время в качестве нормативных документов для проектирования свечей рассеивания и оценки зон распространения возможного выброса используются: руководство по безопасности факельных систем [1] и ОНД-86 [2]. По этим методикам определяются конструктивные и эксплуатационные параметры свечи рассеивания: высота, диаметр, максимальная концентрация газа на приземной поверхности, а также приемлемый массовый расход выброса (кг/с).

Однако, анализ аварий на ООО «Томскнефтехим», газопроводе-подключении газоконденсатного месторождения Крайнего Севера и некоторых других объектах, а также обработка экспериментальных данных по выбросам природного газа показывают, что у поверхности земли может накапливаться газ во взрывоопасных и/или токсичных концентрациях, значительно превышающих предельно допустимые значения [3]. Это свидетельствует о том, что результаты расчетов, выполненных по методикам [1-2], не дают адекватного представления о реальных процессах пространственно-временного рассеивания выбрасываемого со свечи газа. Оценка этих и некоторых других методик расчета рассеивания газов в атмосфере [3] показала, что лежащие в их основе упрощенные допущения и зависимости требуют многочисленных уточнений. Основным недостатком этих методик является использование различных подгоночных коэффициентов вместо прямого учета классов устойчивости атмосферы.

### Математическая модель

Для прогнозирования последствий выбросов опасного газа со свечи рассеивания предлагается воспользоваться математической моделью процесса распространения газозвудушных облаков [4], базирующейся на совместном решении системы фундаментальных уравнений (1-7): уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха или газо-воздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $x_i$  – координаты  $x, y, z$  в метрах ( $x$  – координата в направлении ветра;  $y$  – координата в направлении поперек ветра;  $z$  – вертикальная координата);  $u_i$  – компоненты осредненной скорости ветра  $u, v, w$ , м/с;

уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial(\rho u'_i u'_j)}{\partial x_i} + \rho g_i, \quad (2)$$

где  $p$  – давление, Па;  $u'_i$  – пульсационные составляющие компонентов скорости, м/с;

уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda + c_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где  $h = c_p T$  – энтальпия, кДж/кг;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К);  $T$  – температура воздуха, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля,  $Pr_t = 0.85$ ;

уравнение переноса газа:

$$\frac{\partial(\rho Y_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_s)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_s}{\partial x_i} \right] + S_c, \quad (4)$$

где  $Y_s$  – массовая доля компонента  $s$  газо-воздушной смеси;  $Sc_t$  – турбулентное число Шмидта;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии, зависящий от состава смеси, м<sup>2</sup>/с;  $S_c$  – источниковый член, определяющий генерацию газовой примеси, кг/(м<sup>3</sup>·с);

уравнение переноса  $k$  (турбулентной кинетической энергии):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} + G_b - \rho \epsilon + S_k, \quad (5)$$

где  $S_k$  – источниковый член,  $G_b$  – член генерации (подавления) турбулентности;

уравнение переноса  $\epsilon$  (скорости диссипации турбулентной кинетической энергии):

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (2\mu_t E_{ij} E_{ij} + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (6)$$

где  $S_\epsilon$  – источниковый член, кг/(м·с<sup>4</sup>), который здесь принимается равным нулю; тензор  $E_{ij}$  определяется стандартными выражениями  $k$ - $\epsilon$  модели;  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  – коэффициенты турбулентности;  $C_{3\epsilon}$  – коэффициент, связанный с силами плавучести.

Данная модель прошла верификацию на экспериментальных данных ООО «Газпром Трансгаз Ставрополь» [5]. Однако, полученные рассчитанные значения приземных концентраций, по предложенной модели, позволяют либо оценить возможность выброса опасного газа со свечи рассеивания, либо определить ее высоту и диаметр при проектировании. При эксплуатации же действующих свеч рассеивания для обеспечения экологической безопасности, т.е. исключения возникновения в приземном слое атмосферного воздуха концентраций опасного газа, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), необходимо определить значение приемлемого массового расхода опасного газа (предельно допустимого выброса, далее ПДВ).

#### Методика определения предельно допустимого выброса опасного газа

В общем случае еще до осуществления выброса газа через свечу рассеивания, в атмосфере могут присутствовать его концентрации, так называемые фоновые концентрации  $c_\phi$ . После залпового выброса газа со свечи его концентрация в атмосфере увеличивается по сравнению с ее фоновым значением, и она представляется суммой  $C = c + c_\phi$ , где  $c$  – концентрация газа, выброшенного со свечи. Основным условием, устраняющим вредное воздействие опасного газа на рабочий персонал и окружающую среду, служит соотношение:

$$C = c + c_\phi \leq \text{ПДК}, \quad (7)$$

Уравнение для определения максимальной концентрации  $c_m$  можно представить в виде:

$$c_m = S / V_m, \quad (8)$$

где  $S$  – массовый расход свечи (кг/с), а минимальную величину  $V_m$ , имеющую размерность объемного расхода, называют параметром разбавления и трактуют как объемный расход воздуха, который в данных условиях разбавляет примесь до соответствующей концентрации. Нами предлагается находить минимальную величину  $V_m$  из расчета по приведенной выше математической модели (1-6).

Соотношения (7), (8) позволяют записать:

$$S \leq V_m (\text{ПДК} - c_\phi), \quad (9)$$

Тогда из неравенства (9) для каждой конкретной свечи, загрязняющей окружающую среду, можно установить максимальную производительность, то есть ПДВ [6]. Его значение при фоновой концентрации, не зависящий от скорости и направление ветра, рассчитывается по формуле:

$$\text{ПДВ} = V_m (\text{ПДК} - c_\phi). \quad (10)$$

#### Анализ прогнозируемого расчета сброса опасного газа со свечи рассеивания

В качестве примера исследовался стационарный выброс этилена со свечи рассеивания (высота – 5 м, диаметр – 0,1 м), массовый расход – 28,89 кг/с, в условиях температурной инверсии и малых скоростях ветра на высоте 10 м ( $u = 1$  м/с). Результаты, проведенного нами математического моделирования выброса газа показали, что максимальная концентрация на высоте рабочей зоны в 2 м составила 961 мг/м<sup>3</sup> (в 9,6 раз больше ПДК) на расстоянии 637,3 м от свечи. Принимается допущение, что концентрация этилена  $c_\phi$  в атмосферном воздухе до выброса мала, что ее можно в дальнейшем не учитывать. Тогда параметр разбавления  $V_m$  из соотношения (8) = 30062,44 м<sup>3</sup>/с, а ПДВ согласно уравнению (10) имеет значение = 3006 г/с. Следовательно, в любом произвольном взятом интервале времени массовый расход свечи не должен превышать значения найденного ПДВ.

#### Заключение

Предложена методика определения предельно допустимого выброса опасного газа со свечи рассеивания, позволяющая определить приемлемый максимальный массовый расход опасного газа со свечи рассеивания, и тем самым обеспечить экологическую безопасность в местах постоянного пребывания людей и для окружающей среды.

#### Литература

1. «Руководство по безопасности факельных систем». Серия 03. Выпуск 68.: [утверждено приказом Ростехнадзора N 779 от 26.12.2012]. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 48 с.

2. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромет. Общесоюзный нормативный документ. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. 94 с.

3. Купцов А.И. [и др.]. Проблемы расчета рассеивания легких газов в атмосфере при их выбросах со свечи с учетом рельефа и застройки местности и атмосферной устойчивости / А.И. Купцов [и др.]. // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 6. – С. 284-286.

4. Купцов А.И. [и др.]. Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации. / А.И. Купцов [и др.]. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-7. – С. 1452-1460.

5. Купцов А.И., Акберов Р.Р., Гимранов Ф.М. Влияние метеоусловий на динамику рассеивания опасного газа, сбрасываемого через технологические свечи. / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Ф.М. Гимранов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4 (102). – С. 171-177.

6. Переездчиков И.В., Анализ опасностей промышленных систем человек – машина – среда и основы защиты: учебное пособие / И.В. Переездчиков. – М.: КНОРУС, 2016. – 782 с.

---

© **А.И. Купцов** – канд. техн. наук, инженер каф. промышленной безопасности КНИТУ, artpb@yandex.ru; **Ф.М. Гимранов** - д-р. техн. наук, проф., зав. каф. промышленной безопасности КНИТУ.

© **Kuptsov A.I.** – candidate of technical sciences, engineer department of industrial safety KNRTU; artpb@yandex.ru; **Gimranov F.M.** - doctor of technical sciences, professor, head of industrial safety chair KNRTU, expert-92@mail.ru.