

А. И. Купцов, Д. Я. Исламхузин, Ф. М. Гимранов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССОВ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКОВ ГАЗОВ***Ключевые слова: тяжелый газ, распространение, эксперименты, численное моделирование.*

*Создана экспериментальная установка, позволяющая имитировать процесс распространения газозооушного облака в атмосферном воздухе, возникающего в результате аварийной разгерметизации оборудования. Проведенные исследования показали удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных. В качестве расчетной модели турбулентности использовалась известная модель  $k-\epsilon$  standard.*

*Keywords: heavy gas, distribution, experiments, numerical modeling.*

*An experimental setup been made, allowing to simulate the spread of air-gas clouds in the atmosphere, resulting from rapid depressurization equipment. Studies have shown good agreement between experimental and calculated data. As a computational model of turbulence model was used known  $k-\epsilon$  standard.*

Одной из приоритетных проблем обеспечения промышленной безопасности является прогнозирование возможных сценариев развития аварий на химических и нефтехимических производствах, связанных с выбросами опасных газов и паров. Теоретическому прогнозированию данных ситуаций посвящено множество работ [1-5]. Дать адекватное описание динамики и характера распространения опасных газов посредством упрощенных полуаналитических и полумпирических моделей, как это делается в практических расчетах, весьма сложно, так как характер атмосферной турбулентности и поле скорости в области источника выброса определяется множеством факторов. В настоящее время также используется численное моделирование, основанное на классических законах сохранения. Для подтверждения корректности численных расчетов обычно используют данные натурных экспериментальных исследований и уже случившихся аварий. Следует отметить, что проведение натурных экспериментов обходится крайне дорого, а также представляет угрозу, как для окружающей среды, так и для экспериментаторов. Использование данных уже имевших место аварий представляет значительные трудности из-за определенной ограниченности информации, как по причинам возникновения, так и по развитию и последствиям аварий. К тому же, каждая авария не повторяется, как следствие невозможна их систематизация. На основании выше сказанного, эксперименты в лабораторных условиях явились бы хорошим дополнением к сведениям натурных исследований и аварий. Исследования на модельной установке позволяют имитировать процесс распространения газозооушного облака в открытом окружающем пространстве при различных аварийных ситуациях.

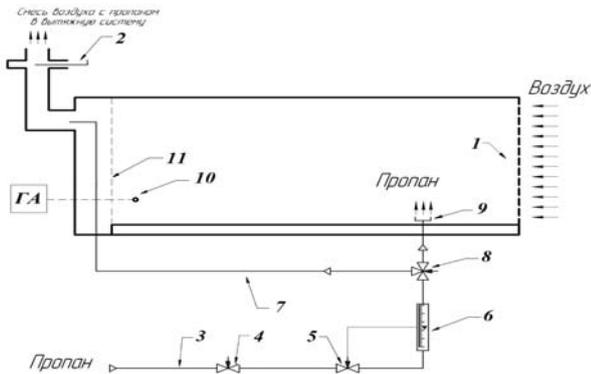
Как показывает практика, преобладающее большинство газовых и паровых выбросов при промышленных авариях в начальный момент времени имеют большую плотность, чем воздух и их, соответственно называют «тяжелыми газами». «Тяжелые газы», склонны к оседанию под действием силы тяжести, и они, как правило, образуют невысокие, но протяженные облака. Весьма опасные условия создаются при распространениях вещества при штилях

и при инверсии, так как в этом случае основная масса «тяжелой примеси» сосредотачивается у поверхности земли и при малых скоростях ветра очень медленно рассеивается [6-7].

Таким образом, было принято решение проводить эксперименты с реальными тяжелыми взрывоопасными газами в малых масштабах (в лабораторных условиях) и при малых скоростях движения воздуха, с последующей верификацией численного моделирования с результатами эксперимента. Для проведения исследований была специально сконструирована экспериментальная установка, представляющая собой камеру размером 1.6x0.7x1.06 м. «Тяжелым газом» был выбран пропан. Аварийный выброс «тяжелого газа» в окружающее пространство имитировали подачей пропана в полость камеры через пропускное устройство.

Для получения скорости движения воздуха в объеме экспериментальной камеры, схожее с движением атмосферного воздуха в окружающей среде при штиле, необходимо было выбрать правильную конструкцию камеры. С этой целью были рассмотрены различные варианты экспериментальной камеры, эффективность каждой из которых оценивалась путем численного моделирования с использованием программного пакета Fluent [8]. Оказалось, что наиболее близкой к имитации маловетреной погоды (плавное слоистое течение) является подача воздуха в камеру через входную перфорированную стенку и удаление воздуха с примесью «тяжелого газа» через перфорированную решетку на выходе (рис.1). Скорость перемещения воздуха внутри исследовательской камеры варьировалась в пределах 0,01 – 0,3 м/с. Визуализация движения потока воздуха в камере осуществлялась за счет подачи дыма. Дым вырабатывался при помощи специально созданного для этих целей дымогенератора.

Данная экспериментальная установка работает следующим образом: после включения вентилятора происходит всасывание воздуха через входную перфорированную стенку 1 в объем экспериментальной камеры.



**Рис. 1 - Схема экспериментальной установки: 1 – входная перфорированная стенка, 2 – шибера, 3 – линия подачи газа, 4 – отсечной вентиль, 5 – игольчатый вентиль, 6 – ротаметр, 7 – байпасная линия, 8 – трехходовой кран, 9 – пропускное устройство подачи газа, 10 – датчик газоанализатора, 11 – перфорированная решетка**

Расход воздуха регулируется с помощью шибера 2. Через основную линию подачи 3 после открытия отсечного вентиля 4 подается взрывоопасный газ (пропан). Его расход регулируется игольчатым вентилем 5, и замеряется ротаметром 6. Для исключения попадания пропана в замкнутый объем до настройки его расхода ротаметром используется байпасная линия 7. Переключение между основной линией 3 и байпасной 7 производится при помощи трехходового крана 8. После настройки расхода, трехходовой кран 8 устанавливается в положение, перекрывающее байпасную линию 7 и открывающее основную линию 3. Затем взрывоопасный газ (пропан) попадает на пропускное устройство 9 (патрубок), конструкция которого представляет сопло с мелкой решеткой и насадкой (для равномерной по сечению подачи газа). Газ (пропан) смешивается с поступающим воздухом, образуя смесь, и распространяется в замкнутом объеме. Датчик газоанализатора 10 фиксирует концентрацию смеси в контрольной точке. Через воздухопровод с помощью вентиляционной системы смесь сквозь перфорированную решетку 11 удаляется из установки в атмосферу.

В качестве средства измерения концентраций пропана в контрольной точке был выбран газоанализатор Сигма-1М. Диапазон измерения газоанализатора – 0 – 50% НКПРП (нижний концентрационный предел распространения пламени), абсолютная погрешность прибора для пропана составляет  $\pm 5\%$  от НКПРП [9].

Была проведена серия экспериментов с распространением пропана при постоянном расходе его подачи. Затем проводилось сравнение данных экспериментов в контрольной точке с данными численного расчета.

В основе численного математического моделирования распространения тяжелых газов заложены основные классические уравнения сохранения: уравнения неразрывности, переноса импульса, переноса энергии, переноса примеси и состояния [10]. При этом необходимо учитывать, что процессы

распространения газозвудушных облаков в природе турбулентны. В настоящее время основным подходом к численному моделированию турбулентных рассеиваний является решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS подход [11-12]). Результатом применения этой методики является выражение корреляционных моментов определенного порядка через корреляционные моменты более низкого порядка или характеристики осредненного течения. Преимуществом данного метода по сравнению с другими являются то, что уравнения Рейнольдса (RANS подход) сразу моделируют весь спектр масштабов турбулентности. Поэтому RANS подход значительно сокращает требования к компьютерным ресурсам и широко распространён в инженерных расчётах [11-12]. Моделирование распространения взрывоопасных газов осуществлялось наиболее часто используемым для этих целей пакетом Fluent [9]. В данной работе использовалась одна из самых распространенных моделей методики RANS-подхода: k-ε standard модель [13]. Данная модель была верифицирована в работах [3,5].

В модели k-ε standard решаются два дополнительных уравнения: уравнение переноса кинетической энергии турбулентности (1) и уравнение переноса скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (2):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - \rho G_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

Здесь  $G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$

$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ , где k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации кинетической энергии, μ – коэффициент молекулярной вязкости, μ<sub>t</sub> – коэффициент турбулентной вязкости, Pr<sub>t</sub> – турбулентное число Прандтля; g<sub>i</sub> – компонент вектора гравитации в i-ом направлении; β – коэффициент термического расширения;

Значения констант были получены в работе [8] на основе обработки данных широкого ряда: C<sub>μ</sub> = 0.09, G<sub>1ε</sub> = 1.44, G<sub>2ε</sub> = 1.92, σ<sub>k</sub> = 1.0.

Для расчетов пристеночных течений использовалась стандартная пристеночная функция для модели k-ε standard.

Сравнение результатов численного расчета с экспериментальными значениями, проводилось по величине концентрации пропана в воздушном потоке в том месте, где размещался датчик газоанализатора (10, рис.1).

Согласно результатам стационарного расчета с использованием модели k-ε standard отклонение результатов численных расчетов распространения газа в установке от показаний датчика газоанализатора составляет в разных пространственных точках исследовательской камеры от 5 до 10% (рис.2).

Линиями тренда на рис.2 обозначены линейные аппроксимации показаний датчика газоанализатора. Эксперименты проводились при скорости движения воздуха в камере 0,05 м/с ( $Re = 6270$ ).

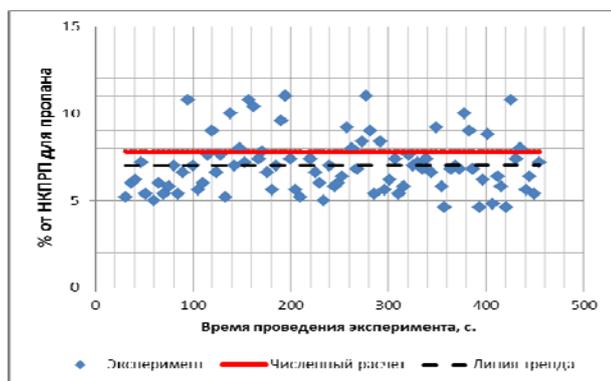


Рис. 2а - Пространственная точка на высоте 0 мм., расход подачи пропана 0,008 м<sup>3</sup>/с

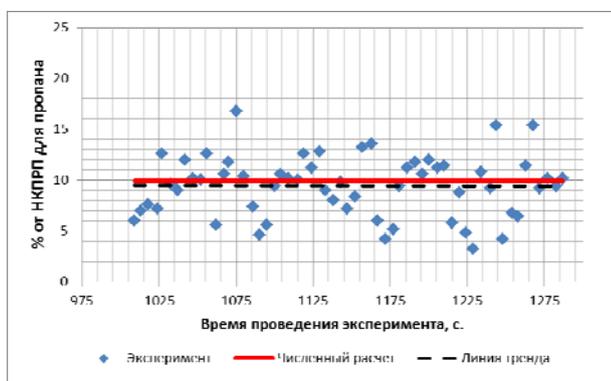


Рис. 2б - Пространственная точка на высоте 105 мм., расход подачи пропана 0,008 м<sup>3</sup>/с

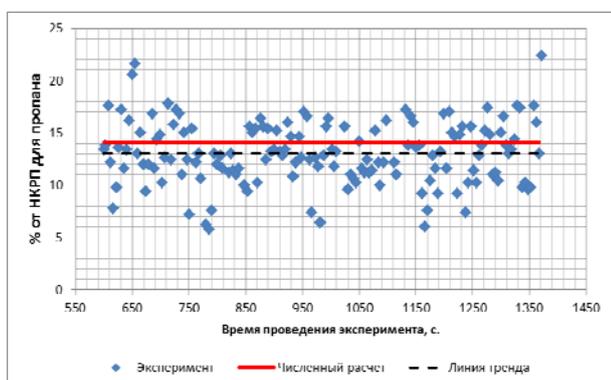


Рис. 2в - Пространственная точка на высоте 180 мм., расход подачи пропана 0,008 м<sup>3</sup>/с

В ходе математического моделирования были получены близкие результаты с экспериментальными данными.

Исходя из результатов проведенных исследований, можно утверждать, что созданная экспериментальная установка позволяет имитировать процесс распространения тяжелого опасного газа в атмосферном воздухе и использовать полученные данные для изучения распространения опасных газов посредством численного моделирования. С помощью установки возможно изучение процессов поведения облаков при наличии препятствий на их пути (условиях застройки производственными помещениями и оборудованием); при различных параметрах источников выбросов (угол наклона, диаметр, высота и т.д.) и при различных параметрах интенсивности выброса опасного газа и скорости движения воздуха.

## Литература

1. Д.Я. Исламхузин. Дисс. канд. техн. наук, Казан. гос. технол. ун-т, Казань, 2003. 119 с.
2. А.Д. Галеев. Дисс. канд. техн. наук, Казан. гос. технол. ун-т, Казань, 2006. 227 с.
3. С.И. Сумской. Дисс. канд. техн. наук, Науч. технич. центр «Пром. безопасность», Москва, 2007. 165 с.
4. Ф.М. Гимранов, Вестник Казан. технол. ун-та, 5, 158-161 (2010).
5. Е.В. Старовойтова, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров, Вестник Казан. технол. ун-та, 13, 175-179 (2011).
6. М.В. Лисанов, А.В. Пчельников, С.И. Сумской, *Российский химический журнал*, XLIX, 4, 18-28 (2005).
7. М.Е. Берлянд, *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Гидрометеиздат, Л. 1985. 272с.
8. *Fluent 6.3 User's Guide*. Lebanon, 2003.
9. *Газоанализатор взрывоопасных газов и паров многоканальный Сигма-1М. руководство по эксплуатации*. ООО «Политехформ-М», Москва 2010. 35с.
10. Ф.Т.М. Ньюстадт, Х. Ван Доп, *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей*. Гидрометеиздат, Л. 1985. 350с.
11. О.В. Батурич, Н.В. Батурич, В.Н. Матвеев, *Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального про-граммного комплекса Fluent: учеб. пособие*. Изд-во СГАУ, Самара 2009. 151с.
12. А.В. Старченко, Д.А. Беликов, В.Д. Гольдин, Р.Б. Нутерман. *Пакет прикладных программ FLUENT для решения задач механики жидкости и газа, тепло и массопереноса*. ТГУ, Томск 2007. 174с.
13. А.Ю. Снегирев. *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений*. Изд-во Политехн. ун-та, СПб, 2009. — 143 с.