

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 полуэмпирических 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 натуральных экспериментальных исследований и уже случившихся аварий. Следует отметить, что проведение натуральных 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 натуральных исследований и аварий. Исследования на модельной установке позволяют имитировать процесс распространения газоздушного 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 – шибер, 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 приоткрытия 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% НКПП (нижний концентрационный предел распространения пламени), абсолютная погрешность прибора для пропана составляет $\pm 5\%$ от НКПП [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 газоздушных 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): (1) -, (2) Здесь , где k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации кинетической энергии, μ – коэффициент молекулярной вязкости, μt коэффициент турбулентной вязкости, Prt – турбулентное число Прандтля; gi – компонент вектора гравитации в i-ом направлении; β – коэффициент термического расширения; Значения констант были получены в работе [8] на основе обработки данных широкого ряда: Cμ = 0.09, G1ε = 1.44, G2ε = 1.92, σk = 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 м3/с Рис. 2б - Пространственная точка на высоте 105 мм., расход подачи пропана 0,008 м3/с Рис. 2в - Пространственная точка на высоте 180 мм.,

расход подачи пропана 0,008 м³/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.