

Выбросы токсичных или взрывоопасных легких газов в атмосферу (газов, плотность которых не превышает 80% от плотности воздуха), таких как метан, природный газ, водородсодержащий газ и т.д., через специальные вертикальные трубы (свечи рассеивания, продувочные свечи) являются регламентируемыми обязательными процедурами, выполняемыми при остановках на ремонт, а также в случаях аварийных сбросов для рассеивания легких газов в атмосфере. Считается что в отличие от тяжелых газов, которые распространяются в приземном слое [1], легкие газы могут подниматься выше уровня источников выбросов и под действием сил плавучести легко рассеиваются. Однако в ряде литературных источниках [2-4] описываются случаи, когда легкий газ, сбрасываемый со свечи, не рассеивался, а распространялся в приземном слое. В связи с этим возникает проблема расчетного подтверждения подобного явления. Но оказалось, что существующие нормативные модели и методики, базирующиеся на различных допущениях, не позволяют учесть это явление. Ниже приведен краткий анализ нормативных моделей. Методика ОНД-86 была введена в 1987 году и предназначена для расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, выбрасываемых предприятиями [5]. Здесь рассматривается только 2-метровый слой воздуха по высоте. Методика имеет нормативный характер и используется при разработке природоохранных мероприятий. Поскольку ОНД-86 основана на аналитических аппроксимациях разностного решения уравнения турбулентной диффузии, она не позволяет вести прямой учет сложной топографии местности, и для этой цели в методике используются различные поправочные коэффициенты, что приводит к упрощению модели. Не учитываются классы устойчивости атмосферы (вместо этого используется коэффициент, зависящий от определенной температурной стратификации атмосферы на разных климатических зонах) и шероховатость подстилающей поверхности, а также скорость истечения газа со свечи, которая может быть значительной. Возможно, по этим причинам при расчетах концентраций природного газа в газовом облаке по ОНД-86 в случае его залповых выбросов со свечи концентрация газа в облаке получается отличающейся от действительной, существенно завышая расчетную концентрацию. В итоге в ОАО «Газпром» отказались использовать эту методику для сценарных и прогнозных расчетов при конкретных метеоусловиях [6]. Подобные проблемы встречаются и в других нормативных методиках. Для расчетов концентраций легких газов в атмосфере используется отечественная программа ТОКСИ-2, основанная на Гауссовой модели рассеяния [7]. В модели предполагается, что концентрация газовой примеси в поперечном сечении облака распределена в горизонтальном и вертикальном направлениях по закону Гаусса с дисперсиями σ_y , σ_z , зависящими от расстояния вниз по ветру от источника, состояния устойчивости атмосферы и характера ландшафта местности. При этом разность плотностей между облаком и окружающим

воздухом не учитывается. Расчет по Гауссовой модели невозможен без выполнения следующих условий: • метеоусловия и характеристики поверхности, определяющие распространение и рассеивание облака, должны быть одинаковы по всей территории и постоянны по времени; • источник выбросов должен действовать в течение длительного времени; • скорость ветра должна превышать 1 м/с. В Гауссовой модели учитываются только два процесса: перемещение газа в поле ветра и его рассеивание за счет атмосферной турбулентности. Гауссовы модели, так же как и ОНД-86, малопригодны для описания рассеивания газов в условиях сложного рельефа местности и промышленной застройки. Эта модель плохо учитывает специфические особенности формирования концентрационного поля вблизи от источника сброса на расстояниях менее 100 м, то есть в наиболее вероятной зоне размещения технологических установок [8]. Несмотря на вышеуказанные недостатки Гауссовых моделей, программа ТОКСИ-2, реализующую одну из таких моделей, активно используется для расчетов рассеивания легких газов в атмосфере. Дальнейшая доработка программы ТОКСИ-2 привела к ТОКСИ-3, которая основана не на Гауссовых, а на интегральных моделях рассеивания газовых примесей в атмосфере [9]. В случае залповых выбросов газов интегральные законы сохранения применяются к облаку в целом, а в случае продолжительных выбросов - к поперечному сечению облака. Однако интегральные модели рассеивания также не позволяют адекватно учесть рельеф местности и наличие застройки. Программа ТОКСИ-3 верифицирована только для расчетов рассеивания тяжелых газов в атмосфере [10]. Еще одна методика расчета концентраций, основанная на Гауссовой модели рассеивания, изложена в ГОСТ Р 12.3.047-2012 [11] и рекомендуется для расчетов изменения во времени концентрации газа в облаке при мгновенном выбросе и непрерывном истечении сжиженного углеводородного газа, плотность которого больше плотности воздуха. В методике используются коэффициенты, которые определяются из задаваемого значения вертикального градиента температуры. Однако градиент температуры по высоте задается без требуемого обоснования, только исходя из класса устойчивости атмосферы, который в свою очередь выбирается также достаточно произвольно. Значения коэффициентов подставляются в уравнения для определения массы и плотности воздуха в паровоздушном облаке и радиуса облака в каждый момент времени. При этом используется предположение о цилиндрической форме облака. Таким образом, указанные выше допущения в различных моделях существенно ограничивают их применимость. Дополнительно к указанному, некоторые из этих моделей принимают плотность примеси равной плотности воздуха, что дает завышенные значения приземной концентрации легкого газа при его выбросе со свечи. При этом не всегда учитывается шероховатость подстилающей поверхности, а выход газов со свечи рассматривается как стационарный процесс. Также различные варианты

устойчивости атмосферы либо не учитываются вовсе, либо учитываются дискретным образом на основании заданного значения вертикального градиента температуры воздуха. В отличие от вышеупомянутых моделей и методик подобными недостатками не обладают CFD пакеты (Fluent, Star CD, CFX, FlowVision и др.). Эти пакеты представляют собой сложные комплексы программ, предназначенные для дискретизации физической области задачи на малые подобласти (конечные объемы или конечные элементы), численного решения дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии с учетом химической кинетики, лучистого теплообмена и т.п. В большинстве CFD пакетов имеется возможность для подключения собственных подпрограмм пользователя для добавления источников членов в решаемые дифференциальные уравнения, задания неоднородных граничных условий, изменений физико-химических свойств отдельных компонентов многокомпонентной смеси и правил их смешения и т.д. Такие пакеты позволяют проводить как в стационарном, так и в нестационарном режиме физико-математическое моделирование процессов распространения и рассеивания газов под действием скорости ветра, молекулярной и турбулентной диффузии, топографических особенностей местности и наличия застройки, шероховатости подстилающей поверхности, плотности и состава газов, теплои массообмена, конденсации, химических реакций, а также различных вариантов устойчивости атмосферы. Однако CFD пакеты обладают большой стоимостью, требуют высококвалифицированных специалистов. Время расчета одного варианта может занимать от нескольких часов до нескольких недель, что не всегда приемлемо, особенно в тех случаях, когда требуется оперативная оценка последствий аварии для принятия экстренных мер по их локализации и ликвидации. На рис. 1-3 приведены примеры моделирования в CFD пакете Fluent 6.3 [12] рассеивания метана при его продолжительном выбросе со свечи высотой 10 м и диаметром 0.1 м (унифицированные размеры, рекомендованные в [13]) для случаев устойчивой, нейтральной и неустойчивой атмосферы. Задача решена в двумерной постановке. Использовалась стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности (возможность применения этой модели была подтверждена в работе [14]) с измененными константами турбулентности в соответствии с работой [15]. Масштаб Монина-Обухова принимался равным 309.5 м - для устойчивой атмосферы, ∞ - для нейтральной атмосферы и -108.1 м - для неустойчивой атмосферы, шероховатость поверхности - 2 мм, а скорость воздуха на высоте 10 метров принималась равной 10 м/с. Параметры на выходе со свечи были следующими: скорость выброса метана: 206.5 м/с (постоянный расход: 15.15 кг/с); плотность газа: 0.6931 кг/м³; давление: 1.026 атмосферы; температура: 17°C. Из рисунков видно, что рассеивание метана существенно зависит от условий устойчивости атмосферы. Для всех трех условий устойчивости атмосферы шлейф достигает поверхности земли, несмотря на высокую скорость

выхода газа со свечи и плавучесть метана в воздухе. Этот принципиально важный вывод был сделан также исследователями, использующих пакет PHAST [2-4]. Концентрации, достигающие НКПРП (нижний концентрационный предел распространения пламени) сохраняются на высоте источника сброса на расстоянии до 150 м. Отметим также, что в случае неустойчивой атмосферы концентрации, соответствующие 0,5 и 0,75 НКПРП, достигают поверхности земли на меньшем расстоянии от источника выброса, чем при остальных условиях устойчивости. Это объясняется более высокой интенсивностью вертикального турбулентного перемешивания в условиях неустойчивой атмосферы. Таким образом, выбросы легких газов со свеч не безопасны. Они могут образовывать протяженные шлейфы взрывоопасных концентраций вблизи приземного слоя. По сравнению с традиционными методиками только CFD моделирование позволит получать наиболее полную картину рассеивания легких газов при выбросах со свеч с учетом рельефа и застройки местности и атмосферной устойчивости. Рис. 1 - Выброс со свечи при устойчивой атмосфере Рис. 2 - Выброс со свечи при нейтральной атмосфере Рис. 3 - Выброс со свечи при неустойчивой атмосфере