

УДК 004.942 : 519.876

Сафонова С.А., к.т.н.

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ

Сафонова С.О. Метод визначення безпечного використання запобіжних клапанів. У статті пропонується метод визначення наслідків аварійних викидів для підтримки прийняття рішень щодо конструкційних особливостей і компоновки запобіжних пружинних клапанів, заснований на моделюванні витікання газової фази з клапана і одночасного розсіювання домішки в атмосфері з урахуванням найгірших погодних умов.

Ключові слова: розсіювання, витікання, зона ураження, технологічний процес, моделювання, запобіжне обладнання.

Сафонова С.А. Метод определения безопасного использования предохранительных клапанов. В статье предлагается метод определения последствий аварийных выбросов для поддержки принятия решений относительно конструкционных особенностей и компоновки предохранительных пружинных клапанов, основанный на моделировании истечения газовой фазы из клапана и одновременного рассеяния примеси в атмосфере с учетом наихудших погодных условий.

Ключевые слова: рассеяние, истечение, зона поражения, технологический процесс, моделирование, предохранительное оборудование.

Safonova S.A. A method for determination of safe use of the safety valves.

The article proposes a method determining the consequences of emergency emissions for decision-support regarding design features and layout of the safety valve springs, based on the simulation of the gas phase of the expiration valve and simultaneous dispersion of contaminants in the atmosphere with a glance of the worst weather conditions.

Keywords: dispersion, flow, affected area, process, modeling, safety equipment.

Постановка проблеми. В соответствии с ГОСТ 12.2.085-2002 "Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности" оборудование, находящееся под давлением свыше 0,07 Мпа, должно эксплуатироваться с установленными предохранительными клапанами различных конструкций и характеристик в зависимости от условий и сред технологических процессов.

В основном такие клапана ставятся непосредственно на емкости или арматуру систем высокого давления и должны соответствовать требованиям нормативной документации, расчетам пропускной способности и конструктивным требованиям, позволяющим обеспечить надежность, прочность и работоспособность. Однако, такие требования приводят к тому, что сброс парогазовой фазы (ПГФ) для снижения избыточного давления происходит непосредственно в атмосферу вблизи выпускного отверстия клапана. Практически никогда не рассматривается вопрос последствий такого выброса, если сбрасываемая ПГФ является чрезвычайно токсичной или взрывоопасной. Так, на предприятии Miro (Германия) произошел сброс значительной части HF через предохранительный клапан, установленный на емкости на высоте 10 метров над уровнем земли, что привело к тяжелым отравлениям двух человек на расстоянии до 170 метров от места выброса. В Дзержинске (РФ) произошел сброс окиси этилена, приведший к отравлению сотрудника предприятия и вспышки в области колонны синтеза в результате экзотермической реакции разложения.

Изменение конструкции клапана, расположения выходного отверстия, выбор условий пропускной способности позволяют предупредить негативные последствия аварийных сбросов.

В статье предлагается метод определения последствий таких выбросов для поддержки принятия решений относительно конструкционных особенностей и компоновки предохранительных пружинных клапанов (ППК), основанный на моделировании истечения газовой фазы из клапана и одновременного рассеяния примеси в атмосфере с учетом наихудших погодных условий.

Целью разработки является математическое обеспечение процесса поддержки решения и выработки рекомендаций относительно безопасной эксплуатации предохранительных клапанов.

Изложение основного материала и обоснование полученных результатов исследования.

Основные результаты исследования заключаются в разработке модели истечения газовой фазы из сложного оборудования, а также методики, позволяющей определить зоны поражений токсичной примесью или распространения горючей взрывоопасной примеси в атмосфере.

Для формализации *модели истечения газовой фазы из сложного оборудования* приняты следующие предположения:

- истечение газовой фазы – изотермическое;
- известны - ограниченный общий объем емкости V_0 , начальное давление P , температура T , состав смеси (постоянен в течение времени истечения);
- истечение возможно через систему трубопроводов, запорной арматуры и другие местные и гидравлические сопротивления;
- изменение давления в емкости происходит из-за уменьшения массы газовой фазы, выбрасываемой из емкости через отверстие истечения площадью F_2 , и увеличения массы газовой фазы за счет прихода через отверстие подпитки площадью F_1 .
- начальное давление газовой фазы в емкости соответствует давлению источника P_s , которое не меняется в течение всего времени существования этого источника (до перекрытия). Внешнее давление равно P_a .

Для расчета расхода истечения газа предлагается преобразовать стационарное уравнение (1) в динамическое с учетом изменения массы газовой фазы и считать массовый расход по зависимости (2) [1]:

$$q = \mu \cdot F \cdot \psi \sqrt{\frac{P}{v}}, \quad (1)$$

- где μ - коэффициент расхода;
 F - площадь плоскости отверстия выброса (м^2);
 P - давление внутри емкости (Па);
 v - удельный объем емкости ($\text{м}^3/\text{кг}$);
 ψ - коэффициент, который определяется в соответствии с [2].

$$\frac{dM(t)}{dt} = \mu \cdot F \cdot \psi(t) \sqrt{\frac{P(t)}{v(t)}}. \quad (2)$$

Представив массовый расход из емкости в конечных разностях, получаем зависимость (3):

$$M_\tau = M_{\tau-1} - \mu_2 \cdot F_2 \cdot \psi_{\tau-1} \sqrt{\frac{P_{\tau-1}}{v_{\tau-1}}} \cdot \Delta\tau, \quad (3)$$

- где $M_{\tau-1}$ - масса газа в емкости в предыдущий момент времени (кг);
 M_τ - масса газа в емкости в расчетный момент времени (кг);

Учитывая что:

$$v_{\tau-1} = \frac{R \cdot T}{M \cdot P_{\tau-1}}, \quad (4)$$

- где R - универсальная газовая постоянная (Дж/моль К);
 M - молекулярная масса выбрасываемого газа (кг/моль);
 $P_{\tau-1}$ - давление в емкости в предыдущий момент времени (Па),

получаем для расчета массового расхода из емкости выражение (5):

$$M_\tau = M_{\tau-1} - \mu_2 \cdot F_2 \cdot \psi_{\tau-1} \cdot P_{\tau-1} \cdot \sqrt{\frac{M}{R \cdot T}} \cdot \Delta\tau. \quad (5)$$

Увеличение массы газовой фазы в емкости за счет прихода через отверстие подпитки будет рассчитано как:

$$\Delta M_\tau = \mu_1 \cdot F_1 \cdot \psi_{1\tau} \cdot P_s \cdot \sqrt{\frac{M}{R \cdot T}} \cdot \Delta\tau. \quad (6)$$

Результирующая масса вещества в емкости определяется как:

$$M_\tau = M_{\tau-1} + \Delta M_\tau. \quad (7)$$

Давление в емкости перерасчитывается с учетом дополнительной массы:

$$P_{\tau} = \frac{M_{\tau} \cdot R \cdot T}{M \cdot V}. \quad (8)$$

Расчет производится до указанного экспертом физического времени окончания процесса или ручной остановки.

Расчет истечения газа через систему местных и гидравлических сопротивлений основан на представлении о перепаде давлений на гидравлическом сопротивлении [3-5]:

$$P_s - P_a = \rho \cdot g \cdot h. \quad (9)$$

h может быть выражена через скорость потока и сопротивление:

$$h = \frac{w^2}{2g} \cdot \left(\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} + \sum_{j=1}^n \zeta_j \right). \quad (10)$$

Для расчета необходимо знать значения набора переменных элементов в системе сопротивления потоку.

Среднюю скорость \bar{w} (м/с) можно вычислить, зная перепад давлений между емкостью и средой истечения, из уравнения:

$$\left(\frac{P_s - P_a}{P_s + P_a} \right) \cdot \frac{4RT}{M} = \bar{w}^2 \cdot \left(0.11 \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{\Delta_i \cdot 10^{-3}}{d_i} + \frac{68 \cdot \nu}{w \cdot d_i} \right)^{0.25} \cdot \frac{l_i}{d_i} + \sum_{j=1}^n \zeta_j \right), \quad (11)$$

где

$$\bar{\rho} = \frac{P_s + P_a}{2} \cdot \frac{M}{RT} - \text{средняя плотность потока (кг/м}^3\text{);}$$

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta \cdot 10^{-3}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} - \text{гидравлический коэффициент трения (формула}$$

Альтштуля);

$$\text{Re} = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu} - \text{число Рейнольдса;}$$

l_i - длина i -го участка трубопровода (м), d_i - диаметр i -го участка трубопровода (м), Δ - эквивалентная абсолютная шероховатость трубы (мм) [3], ν - кинематическая вязкость газа (м²/с), ζ_j - коэффициент местного сопротивления [4], T - температура газа внутри оборудования (К).

Массовый расход системы равен:

$$\frac{dM}{dt} = \bar{w} \cdot \frac{\pi \cdot \left(\sum_{i=1}^m d_i \right)^2}{8} \cdot \frac{(P_s + P_a)M}{RT}. \quad (12)$$

Потеря массы из емкости в единицу времени рассчитывается, как и в предыдущем примере.

Данная модель предназначена для определения количества парогазовой фазы, выбрасываемой из оборудования при аварии. Эти данные являются входными для моделирования рассеяния ОХВ в атмосфере.

Методики, позволяющие определить зоны поражений токсичной примесью или распространения горючей взрывоопасной примеси в атмосфере, можно разделить на численные модели класса CFD [6-8], модели класса аналитических оценок [9-14], оценочные эмпирические [15].

Численное моделирование требует много времени для получения динамических характеристик распространения примеси ОХВ в атмосфере. Поэтому, применение моделей класса CFD исключается. Оценочные эмпирические модели устарели и дают результат, не отвечающий требованиям к качеству прогноза, что не позволяет эффективно ликвидировать последствия выброса.

Поступление парогазовой фазы в атмосферу сопровождается процессом смешения и рассеяния примеси под воздействием ветра и атмосферных течений. Предлагается метод определения параметров распространения опасных химических веществ на базе гауссовой модели Ван Ульдена и Холстлага с учетом действительного состояния атмосферы на момент аварии, возможных колебаний направления и скорости ветра [13, 14].

На основе обработки экспериментальных данных, представленных в работах Берлянда и Бызиной, посвященных атмосферной турбулентности, предлагаются зависимости колебания направлении распространения облака опасных веществ от скорости ветра и времени усреднения. Используя аппроксимацию при обработке данных, ставим в соответствие им функцию отклонения направления ветра от скорости (13) (коэффициенты представлены в табл.1):

$$u(v) = a_i^1 \cdot \exp(a_i^2 \cdot v) + a_i^3, \quad (13)$$

где v - скорость ветра на высоте 1 метр над поверхностью земли, м/с. Рассчитывается согласно профилю скоростей [16].

Таблица 1. Коэффициенты функции отклонения направления ветра в зависимости от скорости и состояния атмосферы

i	Режим устойчивости атмосферы	Коэффициент		
		a_i^1	a_i^2	a_i^3
1	Конвекция (неустойчивое состояние)	16,63	-0,26	0,345
2	Изотермия (равновесно состояние)	6,858	-0,29	1,22
3	Инверсия (устойчивое состояние)	5,519	-0,38	0,8

Отклонение угла направления ветра в зависимости от времени усреднения предлагается определять линейной функцией (14) (коэффициенты представлены в табл.2):

$$u(T) = b_j^1 \cdot T + b_j^2, \quad (14)$$

где T - время усреднения в минутах.

Таблица 2. Коэффициенты функции отклонения угла направления ветра в зависимости от времени усреднения и состояния атмосферы

j	Режим устойчивости атмосферы	Коэффициент	
		b_j^1	b_j^2
1	Конвекция (неустойчивое состояние)	0,118	8,118
2	Изотермия (равновесно состояние)	0,125	2,5
3	Инверсия (устойчивое состояние)	0	0

Общее отклонение направления ветра при заданном времени усреднения и скорости ветра составляет (в градусах):

$$u(v, T) = u(v) + u(T). \quad (15)$$

При расчетах по методам, приведенным в [17], поле заражения местности по пороговой дозе выглядит приближено как эллипс. Половина угла раскрытия сектора составляет 11 градусов.

Учитывая общее отклонение направления ветра при заданном времени усреднения и скорости ветра, полный угол раскрытия сектора определяется как:

$$S(v, T) = (11 + u(v) + u(T)) \cdot 2. \quad (16)$$

Зона возможного поражения определяется наложением сектора на карту с заданным средним направлением ветра.

Скорость, направление ветра, температуру окружающей среды предлагается определять с помощью автоматической цифровой метеостанции

Для полного набора данных необходимо еще знать время суток (день, ночь) и наличие облачности. По умолчанию можно предполагать существование облачности, т.к. этот параметр вносит в прогноз незначительный вклад.

Рассеяние считать для скорости ветра 1 м/с, а время усреднения выбирать как отношение скорости ветра к глубине распространения токсичной или взрывоопасной границы примеси.

Моделирование с использованием изложенных методов позволяет определить пространственные характеристики зон заражения и загазованности взрывоопасной примесью и выработать такие конструктивные решения, которые позволяют избежать отравлений персонала установок и возможных аварий, связанных с воспламенением примеси в атмосфере.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Таким образом, используя предложенные модели, возможно провести анализ технических решений эксплуатации предохранительного оборудования с учетом реальных условий технологического процесса и внешних условий окружающей среды, а также с учетом расположения обслуживающего персонала и близлежащего оборудования.

Моделирование наихудших условий возможных нештатных ситуаций позволяет оценить параметры и характеристики негативных последствий срабатывания предохранительного оборудования и выработать ограничительные требования к его эксплуатации. На основании таких ограничений возможна разработка технических предложений, позволяющих избежать жертв и разрушений при реализации нештатных ситуаций.

1. Крутов В. И. Техническая термодинамика под ред. В. И. Крутова / Учебник для вузов. – М.: «Высш. школа». – 1971. – 176 с.
2. Дейч М. Е. Техническая газодинамика / М. Е. Дейч. – М.: Энергия. – 1974. – 453 с.
3. Григорьев В. А., Зорин В. М. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент.: Справочник / Под общ. Ред. чл.-корр. АН СССР В. А. Григорьева, В. М. Зорина // 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 560 с.
4. Альшгтуль А. Д. Гидравлическое сопротивление / А. Д. Альшгтуль // – М.: Стройиздат. – 1973. – 287 с.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик // – М.: Машиностроение. – 1975. – 237 с.
6. Fairhurst S., Turner R. M. Toxicological assessments in relation to major hazards. / S. Fairhurst, R. M. Turner // Journal of Hazardous Materials 33. – 1993, – p. 215-227.
7. Granovskiy E. A., Lifar V. A., Skob Yu. A., Ugryumov M. L. Computational modeling of pressure effects from hydrogen explosions / E. A. Granovskiy., V.A. Lifar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2 International Conference on Hydrogen Safety. – San Sebastian (Spain). – 2007. – 15 p. (ICHS Paper No. 13).
8. Skob Yu. A., Ugryumov M. L., Korobchynskiy K. P., Shentsov V. V., Granovskiy E. A., Lifar V. A. Numerical Modeling of Hydrogen Deflagration Dynamics in Enclosed Space / Yu. A. Skob, M. L. Ugryumov, K. P. Korobchynskiy, V. V. Shentsov, E. A. Granovskiy, V. A. Lyfar // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 3-rd International Conference on Hydrogen Safety. – Ajaccio (France). – 2009. – 12 p. (ICHS Paper No. 182).
9. Scire J. S., Strimaitis D. G., Yamartino R. J. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (V. 5). / J. S. Scire, D. G. Strimaitis, R. J. Yamartino. // – Earth Tech, Inc. – 2000. – P. 521.
10. Granovsky E. A., Lyfar V. A., Vasilyuk E. V. Industrial accident modeling: consequences and risk / E. A. Granovskiy, V. A. Lyfar, E. V. Vasilyuk // Prevention of Hazardous Fires and Explosions. – Kluwer Academic Publishers (Netherlands). – 1999. – P.183–197.
11. Turren P. B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, Public. / P. B. Turren // Health Service Publication N 999-AP-26, U.S. Department of Health, Education and Welfare. – 1969.
12. U.S. Environmental Protection Agency, Guideline for Air Quality Models, OAQPS Guideline Series, Research Triangle Park, NC. – 1980.
13. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд // – Л.: Гидрометеиздат. – 1985. – 272 с.
14. Суттон О. Г. Микрометеорология: исследование физических процессов в нижних слоях атмосферы / О. Г. Суттон // Л.: Гидрометеиздат. – 1958. – с.356
15. Руководящий документ. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. РД 52.04.253-90 от 21.05.90 г. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 23 с.
16. Ньюстад Ф. Т. М., Ван Допа Х. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф. Т. М. Ньюстада и Х. Ван Допа. – Л.: Гидрометеиздат. – 1985. – 351 с.
17. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-2.2», утв. НТЦ "Промышленная безопасность", согл. Госгортехнадзором России) в сборнике «Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах»: Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2 / Колл. авт. – 2-е изд., испр. и доп. – М.:ГУП НТЦ «Промышленная безопасность» . – 2002. – 208 с.