

Ю. Х. ПОЛАНДОВ, д-р техн. наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра “Механика жидкости и газа, физика горения”, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Россия, 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95; e-mail: polandov@yandex.ru)

А. Д. КОРОЛЬЧЕНКО, лаборант испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ikbs@mgsu.ru)

УДК 614.83;536.46

СПОСОБ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА В НЕГЕРМЕТИЧНОЙ ЕМКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ВВОДА ГАЗА

Известны два способа определения концентрации газа в емкости: первый основан на измерении инфракрасными и масс-спектральными приборами с отбором проб в нескольких точках, второй — на измерении его объема расходомером в негерметичной емкости, заполненной воздухом, и расчете концентрации. Принято считать, что второй вариант уступает по точности первому, что объясняется утечками газа из негерметичной емкости в атмосферу. Указан путь повышения точности определения концентрации газа вторым способом путем расчета утечки газа из емкости. Утверждается, что способ определения концентрации газа с использованием расходомера и расчета его показаний по предложенному варианту не уступает по точности прямым приборным методам измерения, а при внедрении требует затрат на порядок меньше, что дает ему очевидные конкурентные преимущества.

Ключевые слова: негерметичная емкость; расчет концентрации газа; расходомер; математическая модель; процесс подачи газа.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.33-41

Введение

При проведении опытов со взрывами газа в емкостях всегда встает вопрос об определении его концентрации. На практике этот вопрос решается двумя способами. Один из них, прямой, приборный [1–3], предусматривает использование для измерения концентрации газа инфракрасных и масс-спектральных приборов. Другой, широко распространенный, приборно-расчетный [4–6], заключается в измерении расходомером объема газа, поданного в камеру, и расчете концентрации по отношению его объема к объему камеры. Заметим, что при прямом измерении погрешность складывается из двух факторов — погрешности измерительного прибора и погрешности, связанной с неоднородностью газовой смеси в большом объеме. При приборно-расчетном варианте погрешность складывается также из двух факторов — погрешности расходомера и погрешности метода расчета. Сравнивая оба метода, можно отметить, что точность определения первым способом выше, если концентрация измеряется в нескольких точках емкости. В то же время первый метод является наиболее затратным. Если уменьшить погрешность измерений приборно-расчетным методом с

применением расходомера, то он станет наиболее оптимальным.

Целью настоящей работы является снижение погрешности определения концентрации газа в негерметичной емкости при использовании расходомера газа на входе в нее. Достижение цели ожидается путем совершенствования метода расчета показаний расходомера. Для этого была описана математическая модель процесса подачи и накопления газа в емкости и его расхода в атмосферу.

Теория и расчеты. Математическая модель

Данная математическая модель представляет собой уравнение неразрывности применительно к газу, находящемуся в емкости [7, 8]. При решении уравнения использовано условие равенства прихода газа в емкость и его расхода из нее. В практических случаях время нарушения этого равенства ничтожно мало по сравнению со временем заполнения емкости газом [9]. Обоснование метода расчета предлагается в форме решения задачи.

В заполненную воздухом емкость с отверстием, сообщающим ее объем с атмосферой, поступает газ

с известным расходом. Чему равна концентрация газа в емкости через фиксированное время с момента его подачи?

Предварительные допущения:

- газы в газодинамическом понимании приняты идеальными;
- газовая смесь, истекающая из отверстия, по газодинамическим характеристикам не отличается от воздуха и ведет себя как несжимаемая жидкость;
- характерные размеры отверстия ввода газа и отверстия стока в атмосферу по сравнению с размерами емкости пренебрежимо малы;
- смесь *газ – воздух* однородна по концентрации в объеме емкости.

Условные обозначения:

- V — объем емкости, м^3 ;
 v_1 — расход газа на входе в емкость, $\text{м}^3/\text{с}$;
 v_2 — расход смеси *газ – воздух* в атмосферу из емкости, $\text{м}^3/\text{с}$;
 p_0 — атмосферное давление, Па;
 p — давление в емкости, Па;
 ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 F — площадь сечения, сообщающего объем емкости с атмосферой, м^2 ;
 $V_{г0}$ — объем газа, поданного в емкость, м^3 ;
 $V_{г}$ — объем газа, оставшегося в емкости, м^3 ;
 c — точная расчетная концентрация газа в емкости;
 c_0 — концентрации газа в емкости, полученная путем упрощенного расчета;
 c_1 — концентрация газа при условии отсутствия его утечки; $c_1 = (v_1/V)t = V_{г}/V$;
 t — текущее время, с;
 δ — величина утечки газа из емкости; $\delta = c_1 - c_0$.

1. Объем газа в емкости $V_{г}$ равен произведению cV , а его расход в атмосферу — cv_2 . Тогда уравнение неразрывности применительно к газу в емкости при начальных условиях $t = 0, c = 0$ будет выглядеть так:

$$d(cV)/dt = v_1 - v_2 c. \quad (1)$$

Здесь учтено, что концентрация газа в потоке на входе в емкость равна 1.

По мере поступления газа в емкость в ней растет давление, что приводит к расходу из емкости в атмосферу через неплотности или специальные отверстия [10]. Это происходит до тех пор, пока давление в емкости не стабилизируется, а приход и расход газов в емкости не станут равными между собой, т. е.

$$v_1 = v_2. \quad (2)$$

2. Однако время переходного периода для давления невелико, если сравнивать его со временем заполнения емкости газом до нужной концентрации.

Такая задача (сравнение) аналитически вполне разрешима, но достаточно громоздка и поэтому не приводится. Воспользуемся простыми рассуждениями на конкретном примере.

Пример 1

Пусть $V = 10 \text{ м}^3$, $v_1 = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$, $F = 0,0001 \text{ м}^2$, $\rho = 1,23 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Избыточное давление в емкости на стационарном режиме

$$p - p_0 = 0,5(v_1/F)^2 \rho = 61,5 \text{ Па}. \quad (3)$$

Количество газа, которое должно поступить в емкость, должно иметь объем ΔV :

$$\Delta V = (p - p_0)V/\rho = 0,00615 \text{ м}^3. \quad (4)$$

Для поступления в емкость газа в таком количестве потребуется $\Delta V/v_1 = 6,15 \text{ с}$. С другой стороны, время набора концентрации в емкости, скажем, 5 % потребуется около 500 с. Отсюда видно, что время стабилизации ничтожно мало по сравнению со временем заполнения емкости.

Замечание. Увеличение размера отверстия стока приводит к уменьшению и давления в емкости, и переходного времени.

3. Преобразуем уравнение (1) с учетом равенства (2):

$$V(dc/dt) = v_1(1 - c). \quad (5)$$

Разделим переменные:

$$dc/(1 - c) = (v_1/V) dt. \quad (6)$$

Проинтегрируем обе части уравнения:

$$\ln(1 - c) = -(v_1/V) dt + A, \quad (7)$$

где A — произвольная постоянная.

Значение A найдем, используя начальные условия: $A = 0$.

Преобразуем уравнение методом потенцирования и получим искомое решение:

$$c = 1 - \exp\left(-\frac{v_1}{V} dt\right), \quad (8)$$

или в безразмерных переменных

$$c = 1 - \exp(-c_1). \quad (9)$$

Оба уравнения, (8) и (9), позволяют точно оценить концентрацию газа в емкости на любом этапе ввода газа (если обеспечено хорошее перемешивание смеси в емкости) [11]. Однако это выражение не совсем удобно в использовании, поэтому упростим его.

Разложим в ряд Маклорена правую часть уравнения (9), ограничившись тремя членами ряда:

$$1 - \exp(-c_1) = 0 + c_1 - c_1^2/2. \quad (10)$$

Отсюда вытекает упрощенный вариант расчета концентрации c_0 по c_1 :

$$c_0 = c_1 - c_1^2/2, \quad (11)$$

или (что то же самое)

$$c_0 = c_1(1 - c_1/2). \quad (12)$$

На практике обычно проще задавать значение c_0 , чтобы знать, сколько надо подать газа с учетом его потерь при утечке [12, 13]. Для этого представим равенство (12) в виде квадратного уравнения:

$$c_1^2 - 2c_1 + 2c_0 = 0. \quad (13)$$

Разрешим его относительно c_1 и получим окончательно:

$$c_1 = 1 - \sqrt{1 - 2c_0}, \quad (14)$$

или, что то же самое, с использованием размерных величин

$$V_r = V(1 - \sqrt{1 - 2c_0}). \quad (15)$$

Согласно уравнению (15) можно, задавшись необходимой концентрацией газа c_0 , при известном объеме емкости V рассчитать потребный для этого объем газа V_r .

Пример 2

Пусть $V = 10 \text{ м}^3$, а заданная концентрация $c_0 = 0,05$. Тогда в емкость необходимо подать объем газа $V_r = 10(1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,05}) = 0,5132 \text{ м}^3$, или 513,2 л, чтобы в емкости осталось 500 л газа.

На рис. 1,а приведены три графика, на которых по оси абсцисс приведена концентрация газа без учета его утечки, которую можно считать мерой поданного в емкость газа. Из рис. 1,а видно, что по мере заполнения емкости газом темп нарастания в ней его концентрации уменьшается. Отметим также, что зависимости, рассчитанные по точной и упрощенной формулам, начинают заметно расходиться при $c_1 > 0,4$. Однако в наиболее интересном с точки зрения практики диапазоне значений c_1 [0; 0,08], приведенном на рис. 1,б, значения обоих расчетных графиков практически сливаются, и при $c_1 = 0,08$ разница у правой границы между ними составляет менее 0,1 %, а в остальных точках диапазона — еще меньше.

Если не учитывать утечку газа и считать концентрацию газа в емкости равной c_1 , то у правой границы рабочего диапазона разница между c_1 и c составит около 2,6 %. Отношение к этой погрешности зависит от решаемых задач, в том числе в тех случаях, в которых она неприемлема.

Получено простое аналитическое решение, которое не зависит ни от величины прихода газа в емкость, ни от масштаба утечки в атмосферу.

Можно обратить внимание на то, что на результат расчета по всем формулам не влияет размер площади сечения, через которое происходит утечка газа [14, 15]. Этот результат не вполне очевиден, но с фи-

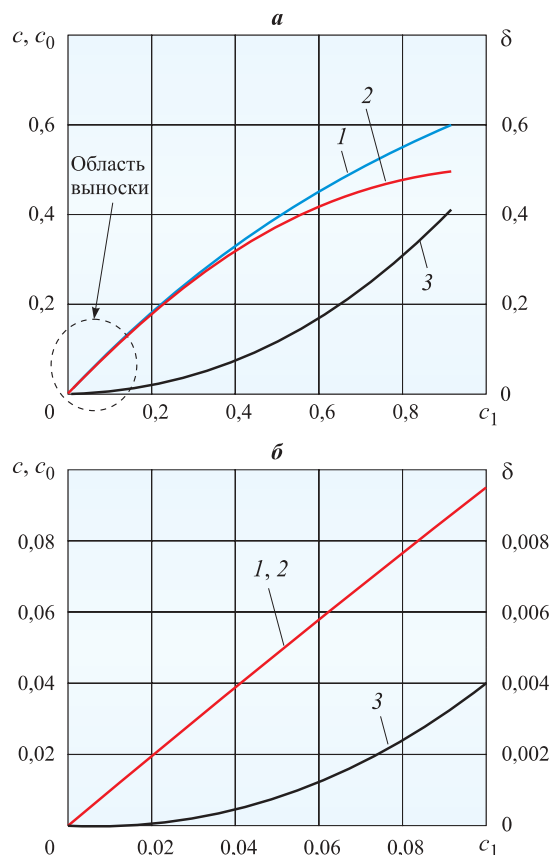


Рис. 1. Расчетные графики по заполнению емкости газом: 1 — $c_0 = c_1(1 - c_1/2)$; 2 — $c = 1 - \exp(-c_1)$; 3 — $\delta = c_1 - c_0$

зической точки зрения вполне объясним. Дело в том, что давление внутри емкости всегда больше атмосферного, так как в нее вдувается газ, чтобы исключить попадание воздуха в емкость [16, 17]. Это утверждение справедливо до тех пор, пока по какой-либо причине, например из-за напора ветра, давление у отверстия снаружи станет выше, чем в емкости. Однако влияние ветра продолжительным быть не может, так как давление в емкости непременно возрастет за счет дальнейшей подачи газа, чем компенсируется напор ветра.

Выводы

Рассмотренный способ определения концентрации с помощью расходомеров предпочтительнее средств измерения концентрации в отдельных точках пространства емкости, так как в этом случае определяется интегральное значение параметра по всему объему. Другое преимущество расходомеров заключается в более низкой стоимости по сравнению с другими средствами измерения [3, 18]. Эти обстоятельства в совокупности с использованием при расчетах по формуле (14) или (15) делает применение расходомеров для определения концентрации газа в негерметичных объемах одним из самых конкурентоспособных способов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. B.* Experimental and numerical study of methane-air deflagrations in a vented enclosure // *Fire Safety Science*. — 2008. — Vol. 9. — P. 1043–1054. DOI: 10.3801/iafss.fss.9-1043.
2. *Bauwens C. R., Chaffee J., Dorofeev S. B.* Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures // 3rd International Conference on Hydrogen Safety (September 16–18, 2009, Ajaccio). — Art. 176. — 12 p. URL: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2009/images/stories/papers/176.pdf> (дата обращения: 20.03.2018).
3. Масс-спектрометрическая установка Cirrus 2 для непрерывного газового анализа при атмосферном давлении. URL: <http://blms.ru/cirrus> (дата обращения: 20.03.2018).
4. *Поландов Ю. Х., Добриков С. А., Корольченко А. Я.* Взрыв газа в цилиндрической трубе с отверстием на боковой поверхности // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2016. — Т. 25, № 11. — С. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.17-26.
5. *Горев В. А., Сальмова Е. Ю.* О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.
6. *Борисов А. А., Комиссаров П. В., Маилков А. Е., Ельшин Р. Н., Силакова М. А.* Взрывное взаимодействие богатой алюминием реагирующей гетерогенной смеси с водой // *Химическая физика*. — 2002. — Т. 21, № 10. — С. 92–96.
7. *Polandov Ju., Korolchenko D.* The consideration of the turbulence influence on the gas explosion expansion in non-closed areas // *MATEC Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 106, Art. 01040. — 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201710601040.
8. *Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F., Byakov A. V.* The analysis of oil suppression by aqueous film forming foam through a gas-salt layer of water // *Advanced Materials Research*. — 2014. — Vol. 1073-1076. — P. 2353–2357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1073-1076.2353.
9. *Борисов А. А., Михалкин В. Н., Хомик С. В.* Экспериментальное исследование распространения детонации газообразных смесей в свободном цилиндрическом заряде // *Химическая физика*. — 1989. — Т. 8, № 6. — С. 798–809.
10. *Поландов Ю. Х.* К вопросу о центральном взрыве газо-воздушной смеси в сферическом объеме // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. — 2012. — № 5(295). — С. 14–21.
11. *Ryuzaki H., Tominaga R.* An experimental and numerical investigation of premixed flame propagation in confined/semiconfined explosion chamber // *International Gas Union Research Conference* (19–21 October 2011, Seoul, Korea). URL: http://members.igu.org/old/IGU%20Events/igrc/igrc2011/igrc-2011-proceedings-and-presentations/poster-papers-session-3/P3-20_Hibiki%20Ryuzaki.pdf/@download/file/P3-20_Hibiki%20Ryuzaki.pdf (дата обращения: 20.03.2018).
12. *Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E.* Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings // *MATEC Web of Conferences*. — 2016. — Vol. 86. — Art. 04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029.
13. *Васюков Г. В., Загуменников Р. А.* Расчет процесса сгорания взрывоопасных облаков и прогнозирование его последствий // *Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы международной научно-практической конференции : в 2 ч.* — М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. — Ч. 2. — С. 25–26.
14. *Васюков Г. В., Загуменников Р. А.* Валидация модели образования взрывоопасной метано-воздушной смеси // *Системы безопасности : доклады научно-технической конференции*. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. — С. 155–157.
15. *Бузаев Е. В., Загуменников Р. А.* Косвенный метод определения коэффициента турбулентной диффузии при формировании взрывоопасных облаков // *Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : материалы международной научно-практической конференции : в 2 ч.* — М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. — Ч. 1. — С. 133–135.
16. *Васюков Г. В., Корольченко А. Я., Рубцов В. В.* Методика расчета минимального количества газоанализаторов до взрывных концентраций для защиты производственных помещений с газобаллонными автомобилями, использующими пропан-бутан // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2006. — Т. 15, № 2. — С. 24–30.

17. Шемарова О. А. Разработка математических моделей и методов расчета процесса течения разреженных газов при взаимодействии с направленными потоками частиц : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 115 с.
18. Счетчик газа NPM G1.6 для учета газообразного топлива в жилищно-коммунальном хозяйстве и быту. URL: <http://vdgu.ru/catalog/schetchiki-gaza/sg-b-npm.html> (дата обращения: 20.03.2018).

Материал поступил в редакцию 22 марта 2018 г.

Для цитирования: Поландов Ю. Х., Корольченко А. Д. Способ расчета концентрации газа в негерметичной емкости в процессе ввода газа // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 4. — С. 33–41. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.04.33-41.