РАСЧЕТ ВЗРЫВОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Кочетов Олег Савельевич,
Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

E-mail: o_kochetov@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена методика расчета взрывных нагрузок на технологическое оборудование, здания и сооружения при воздействии внешних и внутренних аварийных, взрывоопасных факторов. Приводятся конструкции разработанных средств для обеспечения взрывопожаробезопасной работы оборудования в технологических цепочках современного производства. Исследованы параметры предложенных конструкций взрывозащитного устройства.

Ключевые слова: взрывные нагрузки, технологическое оборудование, здания и сооружения, взрывозащитное устройство, сбросное отверстие, скорость распространения пламени.

Математические модели, адекватно описывающие динамику формирования взрывной нагрузки, рассмотрены в работах [1-4]. Аварийные взрывы внутри зданий и помещений характеризуются не детонационным, а дефлаграционным типом взрывного превращения (рис.1).

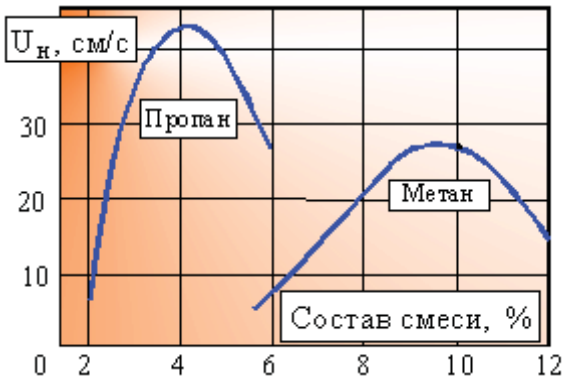


Рис. 1 Зависимости скорости нормального горения от концентрации горючего в смеси

Максимальное значение скорости нормального горения Uн наблюдается при определенном процентном содержании горючего газа в смеси, а скорость распространения пламени существенно меньше скорости звука, при дефлаграционном взрыве реализуется принцип квазистатичности избыточного давления, который заключается в независимости взрывной нагрузки от пространственной координаты.

Для снижения избыточного давления до безопасного уровня в помещениях используют предохранительные конструкции (ПК): остекленные оконные проемы или легкосбрасываемые конструкции (ЛСК). При подходе пламени к сбросному проему происходит резкое изменение плотности истекающих газов, что приводит к появлению во временной зависимости давления первого максимума (рис.2). Второй пик давления соответствует максимальной площади фронта пламени при установившемся процессе истечения через сбросные проемы продуктов сгорания. Величина избыточного давления для любого момента времени определяется темпом роста давления, вызванного выделением продуктов сгорания.

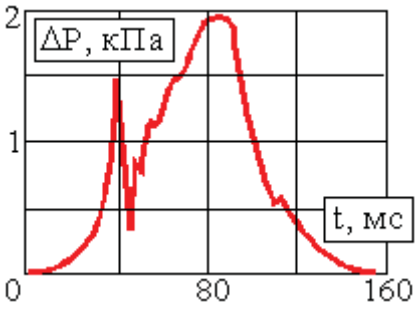


Рис. 2 Типичная осциллограмма избыточного давления
при дефлаграционном взрыве в кубическом объеме

При расчете требуемой площади проходного сечения взрывозащитного устройства для сброса давления взрыва необходимо выполнить следующее условие: повышение давления в защищаемом объеме при горении среды должно быть полностью компенсировано снижением давления вследствие истечения газов через сбросное отверстие, для этого необходимо удалять в единицу времени из объема количество газов, определяемое формулой [5,6]

$$G = Fur(e - 1), \quad (1)$$

где F – поверхность фронта пламени; u – нормальная скорость распространения фронта пламени; r – плотность удаляемого газа; e – степень расширения газов при сгорании.

Величины F, r и e в процессе сгорания и изменения давления также изменяются, но зададимся значением этих величин для наиболее опасного случая, отмечая эти величины индексом m,

$$G_m = F_m u r_m (e_m - 1). \quad (2)$$

Предельное значение плотности газа можно выразить формулой:

$$r_m = r_0 (P_m/P_0)^{1/g}, \quad (3)$$

где P – абсолютное значение давления в защищаемом объеме; g $=C_P/C_V$ – показатель адиабаты; C_P и C_V – средние теплоемкости газов соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме; индекс «о» обозначает начальные значения параметров.

При определении r_m принято, что через сбросное отверстие истекает холодный горючий газ, а не продукты сгорания. Площадь сбросного отверстия должна быть рассчитана таким образом, чтобы при самых неблагоприятных условиях давление в защищаемом объеме не превысило наперед заданной величины P_m.

Степень расширения газов при сгорании изменяется в зависимости от их температуры. При адиабатическом сжатии горючего газа в процессе развития взрыва величину e_m можно выразить в зависимости от давления в соответствии с уравне-нием:

$$e_m = 1 + (e_0 - 1)(P_m/P_0)^{(1-g)/g}. \quad (4)$$

Для эффективной взрывозащиты любого объекта, обусловленной сбросом давления взрыва, необходимо, чтобы предохранительное устройство могло обеспечить расход газов не менее

$$G_m = F_m u r_0 (e_0 - 1)(P_m/P_0)^{(2-g)/g}. \quad (5)$$

Из газодинамики известно, что массовый расход газа под давлением P_m через отверстие может быть выражен следующим образом:

при докритическом режиме истечения, когда $b > (2/(g+1)^{g/(g-1)}$.

$$G_m = \alpha S P_m \sqrt{\frac{2M}{RT}\frac{\gamma}{\gamma-1}\left(\beta^{2/\gamma} - \beta^{(\gamma+1)/\gamma}\right)} \quad (6)$$

при надкритическом режиме, когда b £ $(2/(g+1)^{g/(g-1)})$,

$$G_m = \alpha S P_m \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}} \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \qquad (7)$$

где a – коэффициент истечения сбросного отверстия; S – площадь проходного сечения сбросного отверстия; b = P¢/P_m – максимальный относительный перепад давлений на сбросном отверстии; P¢ – абсолютное давление в пространстве, в которое происходит истечение газов (если сброс газов осуществляется в атмосферу, то P¢=0,1 МПа); M – молекулярная масса газа; T – абсолютная температура сбрасываемого газа; R – универсальная газовая постоянная.

Величина P_m, как уже отмечалось, определяется прочностью защищаемого объекта и представляет собой максимальное давление, которое может быть допущено из условия прочности объекта. Введением этой величины в формулы (6) и (7) по существу и выражается условие максимума массового расхода G_m.

Сопоставляя правые части формул (5), (6) и (7), можно получить соотношения для площади проходного сечения устройств сброса давления взрыва:

для случая докритических режимов истечения, когда b > $(2/(g+1)^{g/(g-1)}$ (8)

$$S \geq \frac{F_m u \rho_0 (\varepsilon_0 - 1)(P_m / P_0)^{(2-\gamma)/\gamma}}{\alpha P_m \sqrt{\left(\frac{2M}{RT}\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)\left(\beta^{2/\gamma} - \beta^{(\gamma+1)/\gamma}\right)}}$$

для случая надкритических режимов истечения, когда b £ $(2/(g+1)^{g/(g-1)})$.

$$S \geq \frac{F_m u \rho_0 (\varepsilon_0 - 1)(P_m / P_0)^{(2-\gamma)/\gamma}}{\alpha P_m \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}} \qquad (9)$$

где F_m – максимальная поверхность фронта пламени $F_m = cF^0_m$;

F^0_m – максимальная поверхность пламени, найденная геометрически в предположении, в первом приближении, что от точки поджога пламя распространяется во все стороны с одинаковой скоростью и поэтому имеет сферическую

форму; с – коэффициент искривления фронта пламени.

Для сосудов цилиндрической формы с отношением длины к диаметру больше единицы величина F_m равна поверхности сферы, вписанной в цилиндрическую часть сосуда.

Производственные помещения чаще всего имеют форму прямоугольного параллелепипеда. Если размеры такого помещения обозначить A, B и C, причем A£B£C, то в случае инициирования горения в геометрическом центре объема максимальную поверхность фронта пламени можно выразить [7,8]

$$F^0_m = pAB,$$

т. е. она не зависит от размера C и определяется только площадью поперечного сечения здания.

Наиболее неблагоприятный случай реализуется, когда через сбросное отверстие истекают не про-дукты сгорания, а холодные газы. Из этого следует, что темпе-ратуру истекающих газов в формулах (8) и (9) можно выразить

$$T = T_0(P_m / P_0)^{(g-1)/g}.$$

Степень расширения газов e при сгорании по существу представляет собой отношение температуры продуктов сгорания к температуре горючей смеси, и поэтому ее легко вычислить по тепловому эффекту химической реакции горения. Для практических инженерных расчетов значительно более удобно пользоваться не величиной e, а функционально связанной с ней степенью повышения давления при взрыве в замкнутом объеме

$$n=1+g(e-1),$$

так как она входит в перечень так называемых стандартных параметров пожаровзрывоопасности веществ, определяется экспериментально и содержится в справочной литературе [3]. С учетом того, что связь между n и e_0 устанавливается зависимостью

$$e_0 - 1 = (n-1)/g \qquad (10)$$

Тогда расчетные формулы для определения площади сбросных отверстий в окончательном виде можно записать следующим образом:

- для докритического режима истечения

$$S \geq \frac{\chi F_m^0 u(\nu - 1)}{\alpha\gamma\left(\frac{P_m}{P_0}\right)^{\frac{3}{2}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} \sqrt{\frac{2RT_0}{M}\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)\left(\beta^{\frac{2}{\gamma}} - \beta^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)}} \quad (11)$$

- для надкритического режима истечения

$$S \geq \frac{\chi F_m^0 u(\nu - 1)}{\alpha\gamma\left(\frac{P_m}{P_0}\right)^{\frac{3}{2}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} \sqrt{\frac{\gamma RT_0}{M}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}} \quad (12)$$

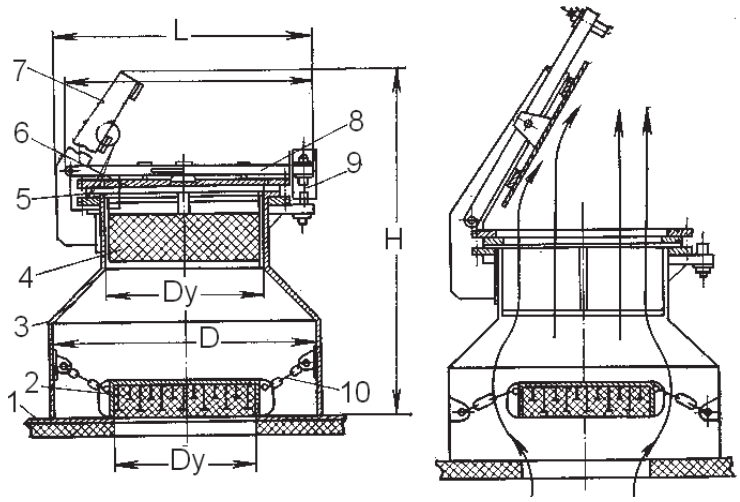
Полученные расчетные формулы можно использовать как в расчете взрывных клапанов и мембран для взрывозащиты технологического оборудования, так и в расчете легкосбрасываемой кровли и вышибных проемов для взрывозащиты зданий.

Причем, в оборудовании могут реализоваться оба режима истечения газов в зависимости от его прочности (давление P_m) и места сброса газов (давление P¢), а при взрывозащите зданий практически всегда допустим только докритический ре-жим истечения, и поэтому для зданий следует пользоваться формулой (11).

На рис.3а,б приведена одна из конструкций взрывного клапана [7-9] в статике (рис.3а) и динамике (рис.3б).

Откидная крышка 6 взрывного клапана (рис.3а) через рычаг 8 удерживается в закрытом положении при разрывном элементе 9, роль которого выполняет проволока калиброванного сечения. Для полной герметизации клапана используется мембрана 5 из алюминиевой фольги или из полимерного материала. Под действием давления в защищаемом аппарате мембрана прижимается к крышке и таким образом через рычаг 8 все усилие от давления передается на шарнир рычага и разрывную проволоку 9. Сама же мембрана при этом оказывается практически полностью разгруженной и на давление срабатывания клапана (разрыв проволоки 9) существенного влияния не оказывает.

На ПЭВМ в компьютерной среде «Excel» были установлены зависимости (рис.4 и 5) для определения диаметра сбросного отверстия взрывного клапана для защиты ци-линдрического сосуда диаметром D =1,8 м и высотой H = 4 м от взрыва паров ацетона, а также выявлена закономерность изменения диаметра сбросного отверстия от скорости распространения пламени.



а б

Рис. 3 Конструкция взрывного клапана его динамика при взрыве
1 - корпус защищаемого аппарата; 2 - футерованный грузовой затвор; 3 - корпус клапана; 4 -теплоизоляция; 5 - герметизирующая мембрана; 6 - крышка; 7 - отбойник; 8 - рычаг; 9 - разрывная проволока; 10 - цепи

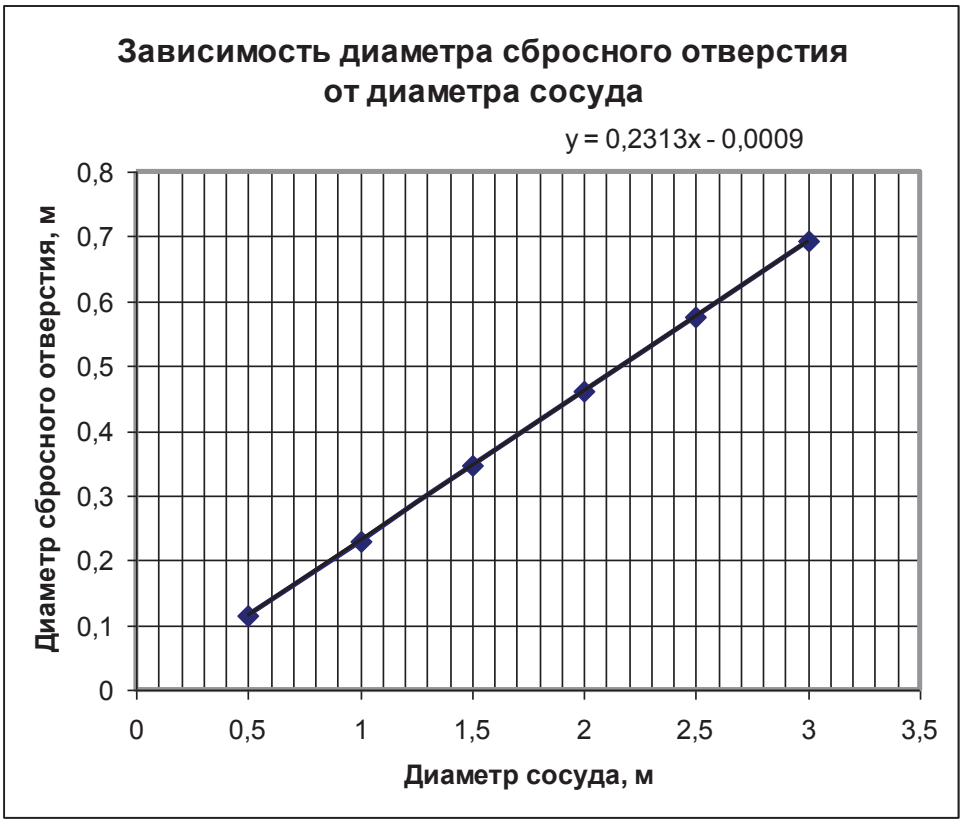


Рис. 4 Зависимость диаметра сбросного отверстия от диаметра сосуда

При анализе полученных результатов были выявлены следующие закономерности:

а) Зависимость диаметра сбросного отверстия от диаметра защищаемого сосуда определяется как линейная и характеризуется следующей, полученной в результате аппроксимации формулой

$$d = 0{,}2313D - 0{,}0009,$$

б) Зависимость изменения диаметра сбросного отверстия от скорости распространения пламени характеризуется следующей, полученной в результате аппроксимации степенной зависимостью

$$d = 0{,}636u^{0{,}5017}.$$

На рис.6 представлена общая схема взрывозащитного производственного здания, состоящего из, расположенного на слое грунта, фундамента, на котором установлено взрывоопасное и пожароопасное оборудование. В ограждениях (боковых и верхних) производственного здания выполнены взрывозащитные элементы: для боковых ограждений – в виде предохранительных разрушающихся конструкций ограждения зданий (рис.7), а для верхних ограждений – в виде взрывозащитной плиты на кровле или чердачном перекрытии здания (рис.8).

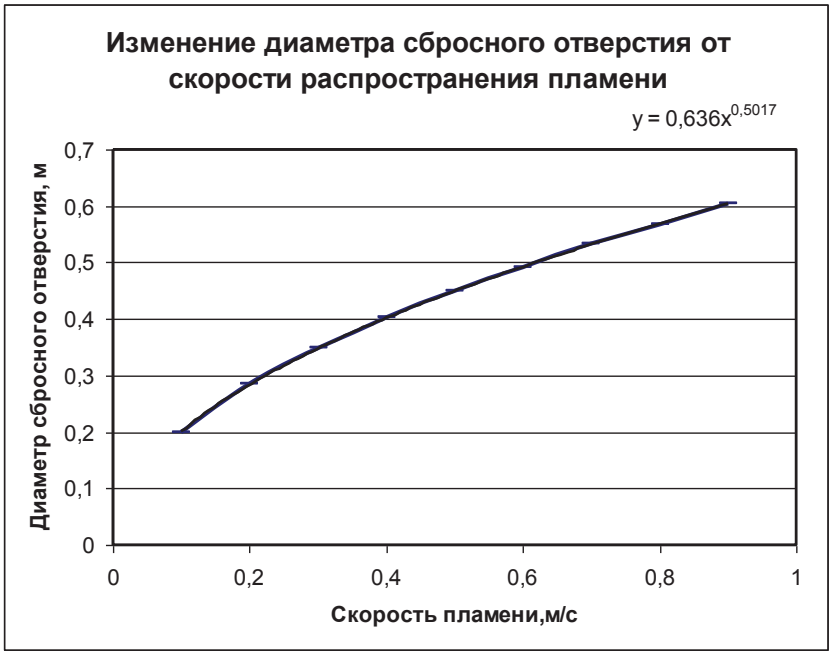


Рис. 5 Зависимость изменения диаметра сбросного отверстия взрывного клапана от скорости распространения пламени паров ацетона в ци-линдрическом сосуде диаметром D =1,8 м и высотой H = 4 м.

Один из вариантов предохранительной разрушающейся конструкции ограждения представлен на рис.7, и предназначенной для безфонарных зданий [9 -13].

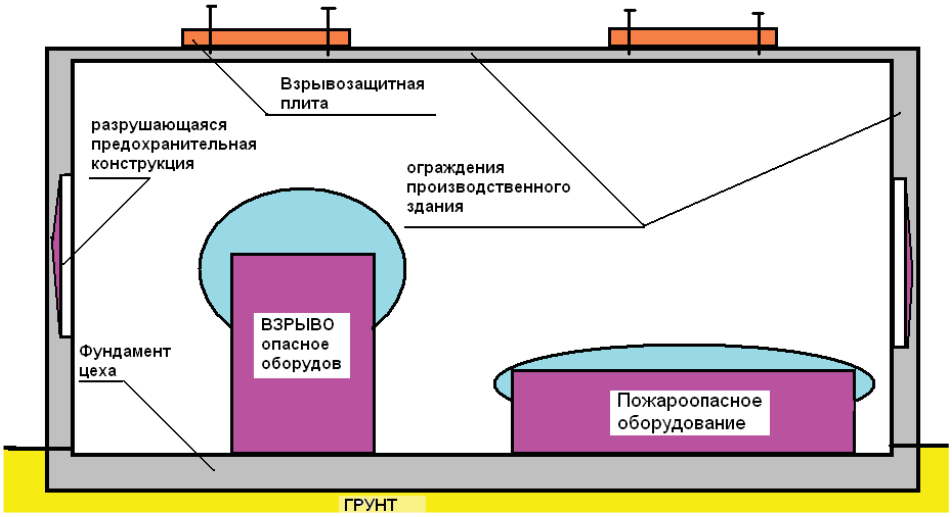


Рис. 6 Общая схема взрывозащитного производственного здания

Разрушающаяся часть выполнена в виде двух коаксиально расположенных ниш (углублений в стене здания), одна из которых, внешняя образована плоскостями 1, 2, 3, 4 правильной четырехугольной усеченной пирамидой с прямоугольным основанием, а другая – внутренняя представляет собой две наклонные поверхности 5 и 6, соединенные ребром 7, с образованием паза, при этом толщина стены от ребра 7 до внешней поверхности ограждения 8 здания должна быть не менее d = 20 мм.

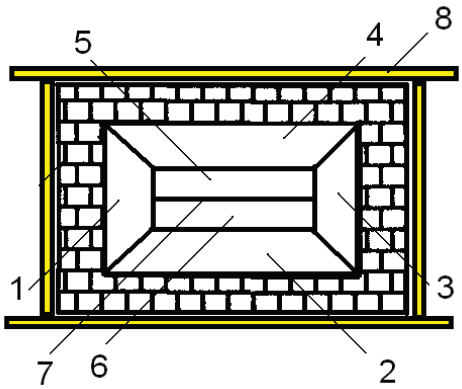


Рис. 7 Схема предохранительной разрушающейся конструкции ограждения зданий

Литература:

1. Комаров А.А.. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка их воздействия на здания и сооружения. МГСУ, 2001 г.
2. Методика оценки последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах/ Бодриков О.В., Елохин А. Н., Рязанцев Б.В. - М.: МЧС России, 1994.
3. Методика расчета нагрузок на здания и сооружения при воздействии внешних аварийных дефлаграционных взрывов. Мишуев А.В., Хуснутдинов Д. 3. -М.: МИСИ, НТЦ «Взрывоустойчивость», 2004. - 65 с.
4. Кочетов О.С. Методика расчета требуемой площади сбросного отверстия взрывозащитного устройства. Журнал «Пожаровзрывобезопасность», № 6, 2009, стр.41-47.
5. Гетия С.И., Кочетов О.С. Эффективность взрывозащитных устройств в технологических процессах. М.: МГУПИ, «Вестник МГУПИ», серия «Машиностроение», № 24, 2009. С.92-104.
6. Кочетов О.С. Расчет взрывозащитных устройств. Журнал «Безопасность труда в промышленности», № 4, 2010, стр.43-49.
7. Баранов Е.Ф., Кочетов О.С.Расчет взрывозащитных устройств для объектов водного транспорта /Речной транспорт (CCI век). № 3, – 2010. С.66-71.
8. Кочетов О.С. Расчет конструкций взрывозащитных устройств. Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности" (http://ipb.mos.ru/ttb). Выпуск № 3 (49), 2013 г.
9. Кочетов О.С., Новиков В.К., Баранов Е.Ф., Маслов И.В. Повышение взрывобезопасности на объектах водного транспорта// Речной транспорт (CCI век). № 2, – 2014. С. 40-43.
10. Кочетов О.С. Теоретические исследования развития взрыва в замкнутых и полузамкнутых объемах// Научные аспекты глобализационных процессов: сборник статей Международной научно-практической конференции (23 сентября 2014 г.,г.Уфа).–Уфа:РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2014.–100с. С. 7-13.
11. Кочетов О.С. Методика стендовых испытаний взрывозащитных мембран// Техника и технологии: Пути инновационного развития [Текст]: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции (30 июня 2014 г.)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014.–271с., С. 166-173.
12. Кочетов О.С. Исследование эффективности взрывозащитных устройств// Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 июня 2014 г.: в 9 частях. Часть 5. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. 164с. С. 78-80.
13. Кочетов О.С. Способ взрывозащиты производственных зданий//

Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 июня 2014 г.: в 9 частях. Часть 5. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. 164с. С. 80-82.