

УДК 661.93

С.В. Кардаков*, А.В. Фёдорова

ОАО «Гипрокислород», 2-й Амбулаторный проезд, 8, г. Москва, РФ, 125315

*e-mail: kardakov@giprokislorod.ru

ОЦЕНКИ ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВОВ РЕЦИПИЕНТОВ И ИХ УЧЁТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВ ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

При проектировании производств продуктов разделения воздуха (ППРВ) необходимо разрабатывать мероприятия по защите персонала, оборудования и зданий от взрывов реципиентов. Для этого нужно использовать методы прогнозирования аварийных взрывов. Излагается методика расчёта количественных показателей поражающих факторов при взрыве реципиентов. Рассматривается возможность их применения для оценки взрывоустойчивости конкретных элементов объекта. Определены подходы к разработке мероприятий по повышению взрывобезопасности ППРВ на основании оценки взрывоустойчивости.

Ключевые слова: *Продукты разделения воздуха. Сжатые газы. Взрывобезопасность. Взрывозащита. Взрывоустойчивость. Взрывопредупреждение. Взрыв. Мощност взрыва. Поражающие факторы взрыва. Критерии поражения воздушно-ударной волной. Оценка поражающих факторов взрыва.*

S.V. Kardakov, A.V. Fedorova

ESTIMATIONS OF SHOCK FACTORS OF EXPLOSIONS OF RECIPIENTS AT DESIGNING MANUFACTURES OF AIR SEPARATION PRODUCTS

At designing of manufactures of air separation products (MASP) it is necessary to develop an actions on protection of personnel, equipment and buildings from explosions of recipients. For this purpose is necessary to use methods of forecasting of emergency explosions. The calculation's method of quantity indicators of shock factors at explosion of recipients is stated. The opportunity of their application for an estimation of pressure relief at concrete elements of object is considered. Approaches to development of actions on increase of explosion safety of MASP on the basis of an estimation of explosion prevention are determined.

Keywords: *Air separation product. Compressed gases. Explosion safety. Implosion protection. Pressure relief. Explosion prevention. Explosion. Capacity of explosion. Shock factors of explosion. Criteria of defeat by an air-shock wave. An estimation of shock factors of explosion.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы взрывобезопасности технологического оборудования производств продуктов разделения воздуха (ППРВ) достаточно хорошо изучены и разработаны [1]. Однако, касаясь в целом производства, нами ранее в [2] обращалось внимание на то, что источником взрывов могут быть блоки разделения воздуха, реципиентные отделения и системы хранения жидких продуктов разделения воздуха. В настоящей статье анализируются взрывы реципиентов. Для оценки их поражающего действия необходима разработка надёжной методики. Перед её изложением рассмотрим некоторые базовые определения и понятия.

Как известно, взрывобезопасность производств продуктов разделения воздуха (ППРВ) обеспечивается выполнением системы мероприятий по взрывозащите, взрывоустойчивости и взрывопредупреждению.

Под взрывоустойчивостью производства понима-

ют его способность выполнять свои функции при воздействии механических факторов аварийного взрыва без нарушения безопасности. Мероприятия по взрывозащите направлены на предотвращение влияния на людей опасных и вредных факторов взрыва и сохранение материальных ценностей. Их объединяет такое понятие, как взрывопредупреждение, представляющее собой систему мер по предотвращению возможности возникновения взрыва.

Часть вышеуказанных мероприятий должна учитываться при проектировании как оборудования, так и самих производств с целью их дальнейшей безопасной эксплуатации.

Потенциальным источником аварийного взрыва на ППРВ является группа сосудов для хранения продуктов разделения воздуха (кислорода, азота, аргона), работающих под давлениями 1-20 МПа (далее по тексту — реципиенты).

В качестве основной задачи прогнозирования

аварийных взрывов следует рассматривать определенные количественных значений поражающих факторов взрыва с целью разработки наиболее эффективных и экономически оправданных способов обеспечения и повышения взрывобезопасности ППРВ.

В настоящей статье излагается подход к обеспечению взрывобезопасности ППРВ. Для его оценки используется метод прогнозирования аварийных взрывов, под которыми понимается чрезвычайная ситуация, возникающая в самый неожиданный момент времени в результате совокупности состояний протекающих технологических процессов или в связи с ошибочными действиями человека [3].

2. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ РЕЦИПИЕНТОВ НА ППРВ

Прогнозирование опасности аварийных взрывов можно проводить в несколько этапов (табл. 1).

2.1. Процесс протекания взрыва

Для правильной оценки опасности источника потенциального взрыва и, соответственно, разработки мероприятий по повышению взрывобезопасности

ППРВ необходимо выявить особенности данных взрывов. Для этого рассмотрим процесс протекания взрыва реципиента.

Как уже упоминалось выше, источник взрыва рассматривается как сосуд, в котором находится сжатый газ под давлением. Разрушение резервуаров осуществляется внутренним давлением (давлением разрушения), которое может достигаться по самым разным причинам.

Энергетический потенциал взрыва определяется энергией адиабатического расширения газов — единственной энергией, которая высвобождается при взрывах таких резервуаров.

Это обусловлено тем, что продукты разделения воздуха являются негорючими газами и, следовательно, при данных взрывах не образуется энергия их сгорания.

По законам термодинамики работа изменения объёма газа в любом процессе выражается как

$$E = \int_{V_1}^{V_2} PdV. \quad (1)$$

Для адиабатного процесса в соответствии с (1) её можно представить в таком виде:

Таблица 1. Этапы прогнозирования опасности аварийных взрывов реципиентов

Наименование этапа	Характеристика
Моделирование аварийных ситуаций в условиях конкретного проектируемого производства	1. Составление сценария аварийной ситуации (модельного взрыва) и определение расчётного варианта. Для проведения расчётов с гарантированным запасом по объёму инженерных мероприятий в качестве расчётного принимается такой случай, когда аварийный взрыв может вызвать максимальное поражающее воздействие. 2. Получение количественных показателей параметров поражающего фактора взрыва.
Оценка поражающих факторов взрыва как расчётных нагрузок и воздействий на производственный комплекс	Оценка воздействия поражающих факторов взрыва на здания и сооружения; оборудование, устанавливаемое снаружи; внешние трубопроводы, электрические сети.
Анализ прочности и устойчивости объектов с учётом воздействия поражающих факторов взрыва, а также анализ компоновочных решений и генплана с учётом минимизации воздействия поражающих факторов взрыва	1. Оценка взрывоустойчивости действующих (реконструируемых) объектов. Критерий — реальная взрывоустойчивость зданий (сооружений). Принимаются во внимание сведения об их устойчивости к другим типам нагрузок и воздействий (длительных, кратковременных, особых). 2. Оценка взрывоустойчивости вновь проектируемых зданий и сооружений. Критерий — величина допускаемого давления на здания и сооружения, определяемая в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. 3. Варианты возможной компоновки объектов производства. Если взрывоустойчивость зданий и сооружений не обеспечивается, то рассматриваются варианты по переносу источников аварийных взрывов.
Использование для разработки мероприятий основного критерия: «защита персонала/минимизация ущерба»	В условиях современных площадок перенос источников потенциального взрыва на безопасное расстояние в большинстве случаев не представляется возможным. Поэтому в зависимости от типа объекта производства, находящегося в очаге поражения, выбирается приоритетный критерий — социальный или экономический: — должна обеспечиваться полная взрывобезопасность зданий в случае нахождения в них производственного персонала либо в случае, если разрушение приведёт к последствиям, оказывающим влияние на системы и элементы ППРВ, важные для безопасности, и на безопасность ППРВ в целом; — в остальных случаях рассчитывается размер материального ущерба и средств на ликвидацию последствий аварий (что «выгоднее» — восстановить здание или обеспечить взрывозащиту).

$$E = V \frac{P_p - P_0}{k-1}, \text{ МДж}, \quad (2)$$

где k — показатель адиабаты; V — объём разрушающегося резервуара, м³; $P_0=0,1$ МПа — атмосферное давление.

Давление разрушения резервуара оценивается по формуле [5]:

$$P_p = 1,2P_{пр}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где $P_{пр}$ — пробное давление при гидравлическом испытании сосуда, МПа.

Мощность взрывов согласно [2] характеризуется тротиловым эквивалентом

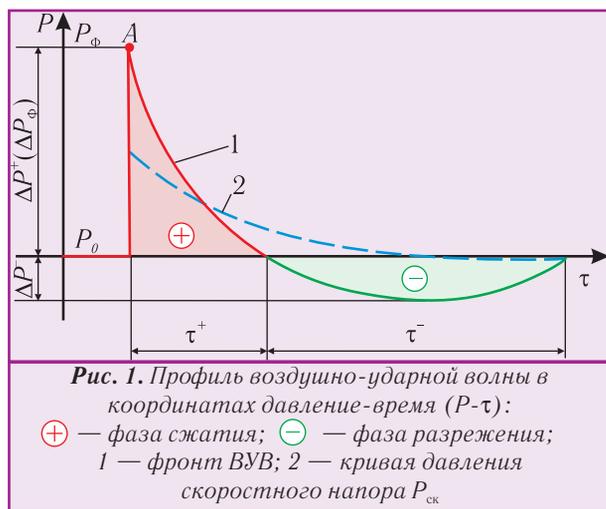
$$W_T = \frac{0,4E}{0,9q_T}, \text{ кг}, \quad (4)$$

где $q_T=4,19$ МДж/кг — удельная энергия взрыва тринитротолуола.

2.2. Характеристики основного поражающего фактора взрыва реципиентов

Основным поражающим фактором при взрыве на ППРВ является воздушно-ударная волна (ВУВ). Особенность взрывов реципиентов — отсутствие такого поражающего фактора как тепловое воздействие. Это связано с тем, что энергетический потенциал данных взрывов определяется только энергией адиабатного расширения (2).

Тепловое же воздействие является следствием возгорания в очаге взрыва и характерно для взрывов топливно-воздушных смесей.



Для определения характеристик основного поражающего фактора взрыва, необходимых для дальнейших расчётов, рассмотрим профиль воздушно-ударной волны (рис. 1).

В точку пространства A ВУВ приходит через некоторое время после взрыва. До её прихода в данной точке — атмосферное давление P_0 . В момент прихода волны оно скачком повышается до максимального значения давления (P_ϕ) во фронте ВУВ.

Разница между максимальным давлением и атмосферным называется избыточным давлением ΔP_ϕ во фронте ВУВ.

За фронтом ударной волны давление $P_\phi = F_1(\tau)$ быстро падает и через некоторое время от момента прихода фронта ударной волны оно становится ниже атмосферного, а затем за время τ восстанавливается до первоначального значения.

ВУВ состоит из двух областей — фазы сжатия и фазы разрежения. Фаза сжатия — время, в течение которого давление в ВУВ сохраняется выше атмосферного. Фаза разрежения — время, в течение которого давление в ВУВ остается ниже атмосферного.

Поражающее действие ВУВ определяется фазой сжатия, а фаза разрежения не играет существенной роли. Она, наоборот, только несколько усиливает действие фазы сжатия.

По окончании фазы сжатия объект попадает в фазу разрежения, в которой давление, оказываемое на объект, существенно уменьшается, а поэтому и разрушения в этой фазе существенно меньше, чем в фазе сжатия. При практических расчётах давление в фазе разрежения не учитывается.

Также ВУВ характеризуется давлением скоростного напора $P_{ск} = F_2(\tau)$, который образуется в результате торможения масс воздуха, следующих за фронтом ВУВ. Тем самым создается динамическая нагрузка, т.е. скоростной напор. Он вызывает опрокидывание и отбрасывание объектов.

Избыточное давление во фронте ВУВ ΔP_ϕ оказывает на объект ударное действие. Если значение ΔP_ϕ выше критических величин, то в объекте возникают различные повреждения и разрушения.

Поражающее действие ВУВ на строительные конструкции и людей определяется следующими параметрами: избыточное давление; давление скоростного напора воздуха; импульс фазы сжатия; длительность фазы сжатия.

Ниже приведены основные расчётные формулы параметров поражающего фактора.

Избыточное давление

$$\Delta P_\phi = (P_\phi - P_0), \text{ Па}. \quad (5)$$

Давление скоростного напора воздуха

$$\Delta P_{ск} = \frac{2,5\Delta P_\phi^2}{\Delta P_\phi + 7P_0}, \text{ Па}. \quad (6)$$

Импульс фазы сжатия

$$I^+ = \exp\left[\frac{-0,843 - 0,932 \ln \lambda - 0,037(\ln \lambda)^2}{E^{1/3}}\right], \text{ с}, \quad (7)$$

где $\lambda = 2,15R_x$ — безразмерное расстояние.

Длительность фазы сжатия

$$\tau^+ = \exp\left[\frac{0,106 + 0,448 \ln \lambda - 0,026(\ln \lambda)^2}{10^5 E^{1/3}}\right], \text{ с}. \quad (8)$$

Критерии поражения ВУВ можно разделить на детерминированные и вероятностные [4].

Детерминированные критерии устанавливают значения параметров ВУВ, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения (разрушения).

Воздействие ВУВ на конструкции во многом определяется величиной отношения времени воздействия фазы сжатия (τ^+ , с) к периоду собственных колебаний конструкции (T , с): при $\tau/T > 2,5$ — воздействие ВУВ определяется величиной ΔP ; при $\tau/T < 2,5$ — на воздействие ВУВ влияет величина I^+ .

Вероятностные критерии показывают, какова условная вероятность того или иного уровня поражения (разрушения) при заданном значении поражающего фактора (избыточного давления или импульса положительной фазы). В качестве вероятностного критерия используются пробит-функции

$$Pr = a + b \ln S,$$

где a, b — константы, зависящие от степени поражения и вида объекта; S — интенсивность воздействующего фактора

Выбор критерия для оценки поражающего воздействия ударной волны зависит от поставленной перед разработчиками проекта задачи.

Для оценки воздействия ВУВ на строительные конструкции целесообразнее использовать детерминированный критерий, так как он позволяет методом сравнения с критическими величинами оценить нагрузки. Таким образом удастся получить количественный показатель поражающего фактора в точке. Детерминированный критерий даёт возможность провести детальный анализ форм и собственной частоты колебаний конструкций и оценить предельное их состояние в результате воздействия аварийного взрыва.

Для оценки же человеческих потерь удобнее пользоваться вероятностным подходом, так как на его основе находится процентное распределение вероятности поражения людей. Методом сравнения с критическими величинами оценить гибель людей сложно, так как тот или иной вид поражения может произойти в некотором диапазоне значений параметров поражающего фактора.

2.3. Определение нагрузок, возникающих при аварийных взрывах реципиентов

На основе рекомендаций [3,5,6] нами была разработана методика расчёта количественных показателей взрыва реципиентов.

Для вычисления давления воздушной ударной волны на заданном расстоянии R от центра её возникновения при детонации предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние

$$R_x = R / \left(\frac{E}{P_0} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Далее определяется безразмерное давление P_x как

$$\ln P_x = -1,124 - 1,66 \ln R_x + 0,26 (\ln R_x)^2. \quad (10)$$

После этого вычисляем соответствующее избыточное давление

$$\Delta P = P_x P_0. \quad (11)$$

Используя формулы (9)-(11), можно получить зависимость избыточного давления от расстояния в виде:

$$\Delta P = 0,1 \cdot 10^3 P_x, \text{ кПа}. \quad (12)$$

где $P_x = \exp[-1,124 - 1,66 \ln R_x + 0,26 (\ln R_x)^2]$.

Формула (12) справедлива для значений R_x больших 0,2 и меньших 24. В случае, если $R_x < 0,2$ м, то величина избыточного давления полагается равной 1800 кПа.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОЦЕНКИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ

Мощность аварийных взрывов при различных геометрических параметрах резервуаров и давлении может отличаться во много раз. В табл. 2 приведены расчётные тротиловые эквиваленты при полном разрушении некоторых резервуаров.

Таблица 2. Мощность аварийных взрывов некоторых реципиентов

Параметр сосуда	Кислород		Азот	
Объём сосуда, м³	125	63	50	100
Рабочее давление, МПа	3	3,5	0,8	0,8
Давление гидравлического испытания, МПа	4,4	4,4	1,14	1,14
Давление разрушения, МПа	5,28	5,28	1,36	1,36
Тротильный эквивалент, кг	171,7	86,6	16,7	33,4

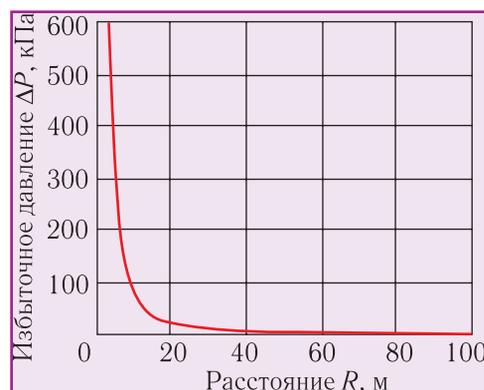


Рис. 2. Изменение избыточного давления во фронте ударной волны в зависимости от расстояния

Рассмотрим практическое применение оценки количественного значения параметров основного поражающего фактора взрыва на примере модельного взрыва реципиента с газообразным кислородом объёмом 63 м³ и рабочим давлением 3,5 МПа.

Таблица 3. Обобщённая оценка степени повреждения зданий и поражения людей

Характер повреждения здания ¹⁾	Характер поражения людей ²⁾	Избыточное давление ΔP , кПа	Расстояние от центра взрыва, м
Полное	Крайне тяжёлые	≥ 100	11
Сильное	Тяжёлые	70	13
	Средней тяжести		
Среднее	Лёгкие	28	22
Слабое		14	35
Частичное разрушение остекления		≤ 2	> 400

Примечания: ¹⁾ При полных разрушениях здания оно восстановлению не подлежит; при сильных — подлежит сносу; при средних — возможно восстановление здания; при слабых — разрушаются оконные проёмы и легкосбрасываемые конструкции. ²⁾ При получении крайне тяжёлых травм возможен смертельный исход; при тяжёлых — сильная контузия всего организма, тяжёлые переломы, внутренние кровоизлияния; при травмах средней тяжести — травмы головы с потерей сознания, переломы и вывихи конечностей, потеря слуха; при лёгких травмах — лёгкая контузия, вывихи, ушибы.

Таблица 4. Оценка повреждений элементов зданий

Характер повреждений элементов зданий	Критическое давление ΔP , кПа	Расстояние от центра взрыва, м
Разрушение остекления	2-7	400-60
Разрушение перегородок и кровли:		
– деревянных каркасных зданий	12	40
– кирпичных зданий	15	33
– железобетонных каркасных зданий	17	30
Разрушение перекрытий:		
– деревянных каркасных зданий	17	30
– промышленных кирпичных зданий	28	22
– промышленных зданий со стальным и железобетонным каркасом	30	21
– зданий с массивными стенами	42	17,5
Разрушение стен:		
– шлакоблочных зданий	22	26
– деревянных каркасных зданий	28	22
– кирпичных зданий со стенами в 1,5 кирпича	40	18
– зданий с массивными стенами	100	11
Разрушение фундаментов	215-400	7,5-5,4

В данном примере в качестве основного применяется детерминированный критерий оценки поражающего действия ВУВ.

роприятия можно разделить на две группы:

1. Взрывозащита производства:
 - повышение взрывоустойчивости зданий, со-

Таблица 5. Оценка повреждений промышленных конструкций

Характер повреждений промышленных конструкций	Критическое давление ΔP , кПа	Расстояние от центра взрыва, м
Незначительное повреждение стальных конструкций каркасов, ферм	8-10	55-45
Разрушение стальных каркасов, ферм и перемещение оснований	20	27
Разрушение промышленных стальных несущих конструкций	20-30	27-21
Разрушение опорных структур резервуаров	100	11
Перемещение цилиндрических резервуаров, повреждение трубопроводов	50-100	15,5-11
Повреждение ректификационных колонн	35-80	19-12
Незначительные деформации трубопроводных эстакад	20-30	27-21
Перемещение трубопроводных эстакад, повреждение трубопроводов	35-40	19-18
Разрушение трубопроводных эстакад	40-55	18-14,8

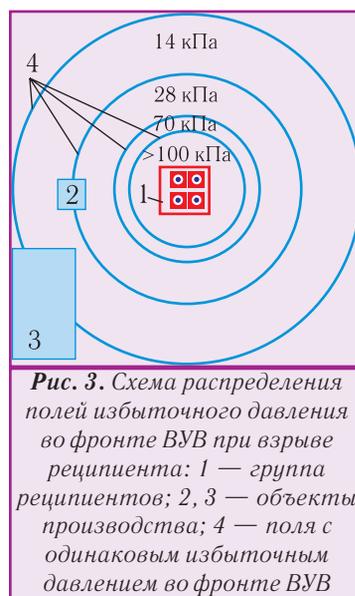


Рис. 3. Схема распределения полей избыточного давления во фронте ВУВ при изменении предполагаемой взрывной нагрузки в зависимости от расстояния до центра взрыва.

Сначала проводится обобщённая оценка поражающего действия (табл. 3).

На рис. 2 показан характер изменения предполагаемой взрывной нагрузки в зависимости от расстояния до центра взрыва.

Детальную оценку взрывоустойчивости объектов производства можно выполнить, исходя из значений критического давления для конкретного элемента объекта [4] (см. таблицы 4, 5).

Детальная оценка степени поражения людей приводится в таблицах 6, 7 [4].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения возможных путей повышения взрывобезопасности ППРВ вернёмся к главному критерию — «защита персонала/минимизация ущерба» (см. табл. 1). Основные ме-

Таблица 6. Степень поражения органов слуха

Эффект	Критическое давление ΔP , кПа	Расстояние от центра взрыва, м
Граница временной потери слуха	2	400
Нижний порог разрыва барабанной перепонки	34,5	19,4
Вероятность разрыва барабанной перепонки 50 %	103	10,7
Вероятность разрыва барабанной перепонки 100 %	400	5,7

Таблица 7. Степень поражения людей в зданиях

Вид воздействия	Критическое давление ΔP , кПа	Расстояние от центра взрыва, м
– Гибель* людей в результате прямого воздействия ВУВ – Гибель людей под развалинами зданий – Гибель людей вследствие удара о твёрдые предметы	190	8
– Серьёзные повреждения в результате действия ВУВ – Серьёзные повреждения при обрушении здания или перемещения тела взрывной волной	69-76	13,2-12,5
– Серьёзные повреждения барабанных перепонки и лёгких под действием взрывной волны – Поражения осколками и развалинами здания	55	14,8
– Поражения осколками и развалинами здания – Вероятность разрыва барабанных перепонки 10 %	24	24
– Временная потеря слуха или травмы в результате вторичных эффектов взрывной волны (обрушение здания и перенос тела) – Летальный исход или серьёзные повреждения от прямого воздействия взрывной волны маловероятны	16	32
– Травмы, связанные с разрушением стекол и повреждением стен здания	5,9-8,3	73-53

Примечание: * Вероятность гибели человека приравнивается к 100 %. Некоторая вероятность гибели людей возможна в каждом случае.

оружий и оборудования к поражающим факторам взрыва;

– использование (в строго обоснованных случаях) дополнительных защитных сооружений, снижающих расчётные параметры воздействия поражающих факторов взрыва.

2. Допустимость разрушений и планирование восстановительных работ в максимально короткие сроки:

– оснащение зданий легкобрасываемыми конструкциями;
– расчёт допустимого процента остекления зданий для предупреждения обрушения несущих конструкций.

В рассмотренном примере приводится распределение полей избыточного давления взрыва на основании количественных показателей параметров основного поражающего фактора взрыва (см. рис. 3).

При построении полей избыточного давления учитывается вероятность разрушения каждого реципиента из группы. Зоны действия поражающих факторов объединяются от всех центров взрыва.

По результатам проведённого прогнозирования определяется, какие объекты производства попадают в очаг поражения и какие участки производства требуют разработки тех или иных мероприятий. Таким образом формируется комплексная система мероприятий по обеспечению взрывобезопасности ППРВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Файнштейн В.И.** Кислород, азот, аргон — безопасность при производстве и применении. — М.: Интермет Инжиниринг, 2008. — 192 с.
2. **Кардаков С.В., Фёдорова А.В.** Оценка взрывобезопасности производств продуктов разделения воздуха // Технические газы. — 2008. — № 6. — С. 65-67.
3. РБГ-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия.
4. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. — М.: ВНИИПО, 2006. — 93 с.
5. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. — М.: ОАО «НТЦ Промышленная безопасность», 2006. — 208 с.
6. Оперативное прогнозирование состояния объектов при аварии со взрывом. — М.: МЧС России, 2007. — 24 с.