

УДК 389.17:006.  
ББК 69.68  
К 59

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Ведущий научный сотрудник Института аграрных проблем РАН  
доктор экономических наук С.А. Андриющенко  
Заведующий лабораторией надежности и взрывобезопасности  
ДОО «ВНИПИгаздобыча», кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник В.А. Сорокованов

Одобрено  
редакционно-издательским советом  
Саратовского государственного технического университета

**Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.**

К 59      **Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков.** Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 178 с.

ISBN 5-7433-1018-1

Рассмотрены теоретические основы и практика анализа техногенных рисков, обоснованы вероятностные методы количественной оценки опасностей объектов техносферы.

Монография адресована инженерам и экологам, экономистам и менеджерам, работникам государственных органов власти, специалистам в области промышленной безопасности, студентам и аспирантам технических и экономических вузов.

Ил. 88. Табл. 63. Библ. 261 наим.

УДК 389.17:006  
ББК 69.68

ISBN 5-7433-1018-1

© Саратовский государственный  
технический университет, 2002  
© Козлитин А.М., Попов А.И.,  
Козлитин П.А., 2002

<http://risk-2005.narod.ru/>

[kammov@gmail.com](mailto:kammov@gmail.com)

## **ГЛАВА 5**

### **АНАЛИЗ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВОВ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОСФЕРЫ**

Активная политика государства в области промышленной безопасности, принятый в 1997 г. закон РФ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [211], целый ряд постановлений правительства и подзаконных актов выдвинули на первый план проблему анализа, количественной оценки и управления рисками аварий потенциально опасных объектов техносферы.

Разработанная отечественными и зарубежными авторами методология техногенных рисков [55;82;113;186;246] предполагает учет поражающих факторов, формирующихся при реализации опасностей на взрыво-, пожаро- и токсикоопасных промышленных объектах. Расчет полей поражающих факторов, возникающих при взрывах, пожарах или формировании токсичного облака, - достаточно сложный и ответственный этап количественной оценки техногенных рисков. Это объясняется тем, что степень адекватности предлагаемых методик реальным процессам изменения избыточного давления на фронте ударной волны, теплового излучения или токсодоз в рассматриваемой точке территории, значительно влияет на уровень достоверности полученных значений рисков аварий на потенциально опасных объектах техносферы.

Однако существование в настоящее время большого количества разнообразных методик, существенно различающихся по точности, сложности и глубине проработки процессов формирования полей поражающих факторов и использование их исследователями при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов определяет необходимость их сравнения и всестороннего анализа. Решение данной задачи позволит снизить неопределенность получаемой информации и повысить эффективность реализуемой на практике Госгортехнадзором России и МЧС России идеи управления степенью риска в техносфере.

Остановимся более подробно на сравнительном анализе существующих методик оценки последствий взрывов на потенциально опасных объектах.

При выполнении расчетов необходимо различать взрывы твердых (конденсированных) взрывчатых веществ, взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС) горючих жидкостей или сжиженных газов и взрывы пылевых облаков.

Аварии в промышленности с выбросом горючих жидкостей или сжиженных газов могут происходить как в замкнутых объемах различных помещений производственных зданий и сооружений, так и в неограниченном пространстве на открытых технологических установках.

Одной из наиболее серьезных опасностей пожаровзрывоопасных производств является газопаровое облако, которое образуется при разгерметизации магистральных продуктопроводов, оборудования открытых технологических установок или квазимгновенном разрушении резервуаров хранения и испарении разлитий жидкостей в неограниченном пространстве. Образование газопарового облака может привести к появлению трех типов опасностей:

- токсическому воздействию;
- крупному пожару;
- взрыву газопаровоздушной смеси.

Анализ аварийных ситуаций показывает, что при аварийной разгерметизации оборудования и при наличии в начальный момент времени источника воспламенения возникает пожар разлития либо факельное горение. Возникновение источника воспламенения, когда газопаровоздушная смесь в результате эволюции достигла опасных концентрационных пределов воспламенения, в диапазоне от верхнего предела концентрации (ВКПВ) до нижнего его значения (НКПВ), приводит к взрыву. При отсутствии источника воспламенения в начальный момент времени формируется газопаровое облако, которое рассеивается по направлению ветра, представляя токсическую опасность для прилегающих территорий.

При токсическом воздействии превалирует риск социального ущерба, при пожарах разлитий преобладает риск материального ущерба, при взрывах газопаровых облаков определяющим является интегрированный риск значительных материальных и социальных потерь.

В данной главе анализируются методики, используемые в нормативной и справочной литературе для оценивания последствия взрывов неорганизованных облаков газопаровоздушных смесей горючих веществ.

Различают два основных типа взрыва газопаровоздушных смесей - детонационный и дефлаграционный. При аварийных выбросах горючих веществ на открытых технологических установках невозможно заранее предсказать тип и скорость взрывного превращения облака ГПВС, так как условия для возникновения детонации или дефлаграции с соответствующей скоростью фронта пламени будут определяться множеством случайных внешних факторов. К данным факторам можно отнести уровень чувствительности опасного вещества к инициированию взрывного процесса, наличие ограничения окружающего пространства различными преградами и препятствиями (наличие домов, сооружений, стен и т.п.), время и место возникновения и мощность источника зажигания, степень отклонения локального состава смеси от стехиометрического в момент воспламенения эволюционирующего по направлению ветра облака ГПВС и т.д. Поэтому, при прогнозировании последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах необходимо предварительно идентифицировать наиболее вероятный режим взрывного превращения облака ГПВС.

Анализ литературных источников позволяет утверждать, что в настоящее время нет апробированных математических моделей взрывного превращения газопаровоздушной смеси, позволяющих однозначно предсказать скорость распространения в облаке фронта пламени. В этой связи целый ряд авторов и внутриведомственных методик [121;126;186] предлагают для прогнозных оценок режима горения использовать экспертную таблицу Института химической физики РАН, в которой вещества, способные к образованию горючих смесей с воздухом, разделены по чувствительности к инициированию взрывных процессов, а окружающее пространство разбито на классы в соответствии со степенью его загроможденности.

*1. Определение режима взрывного превращения облака ГПВС по экспертной таблице Института химической физики РАН*

По классу пространства, окружающего место воспламенения облака ГПВС (табл.5.1) и классу вещества, участвующего во взрыве (табл.5.2) по экспертной таблице Института химической физики РАН (табл.5.3) определяется класс режима горения вещества.

Таблица 5.1

Характеристика классов пространства, окружающего место аварии

№ класса	Характеристика пространства
1	Наличие смежных объемов, длинных труб, полостей, заполненных горючей смесью и т.д.
2	Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий
3	Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк
4	Слабо загроможденное и свободное пространство

Таблица 5.2

Классификация взрывоопасных веществ

Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
ацетилен	акрилонитрил	ацетальдегид	аммиак
винилацетилен	акролеин	ацетон	бензол
водород	бутан	бензин	декан
гидразин	бутилен	винилацетат	дизтопливо
изопропилнитрат	бутадиен	винилхлорид	о - дихлорбензол
метилацетилен	1,3-пентадиен	гексан	додекан
нитрометан	пропан	генераторный газ	керосин
окись пропилена	пропилен	изооктан	метан
окись этилена	сероуглерод	метиламин	метилбензол
этилнитрат	этан	метилацетат	метилмеркаптан
	этилен	метилбутилкетон	метилхлорид
	эфиры:	метилпропилкетон	нафталин
	- диметилловый	метилэтилкетон	окись углерода
	- дивиниловый	октан	фенол
	- метилбутиловый	пиридин	хлорбензол
	- диэтиловый	сероводород	этилбензол
	- диизопропиловый	спирты:	дихлорэтан
	ШФЛУ	- метиловый	трихлорэтан
		- этиловый	
		- пропиловый	
		- амиловый	
		- изобутиловый	
		- изопропиловый	
		циклогексан	
		этилформиат	
		этилхлорид	
		сжиженный природный газ	
		кумол	
		печной газ	
		циклопропан	
		этиламин	

Таблица 5.3

Экспертная таблица (класс режима горения)

Класс топлива	Класс окружающего пространства			
	1	2	3	4
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

По классу режима горения вещества определяется режим взрывного превращения облака ГПВС и диапазон скоростей распространения фронта пламени  $\omega$ , м/с (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Классификация режимов взрывных превращений облака ГПВС по диапазонам скоростей распространения фронта пламени

Класс режима горения	Режимы взрывных превращений облака ГПВС
1	детонация или горение со скоростью фронта пламени $\omega \geq 500$ м/с
2	дефлаграция, $\omega = 300-400$ м/с
3	дефлаграция, $\omega = 200-300$ м/с
4	дефлаграция, $\omega = 150-200$ м/с
5	дефлаграция, $\omega \equiv k_1 \cdot M^{1/6}$ , где $k_1 = 35 \div 43$ ; M – масса топлива в облаке ГПВС в тоннах
6	дефлаграция, $\omega \equiv k_2 \cdot M^{1/6}$ , где $k_2 = 17 \div 26$

Приведенная экспертная оценка диапазона скоростей распространения фронта пламени при взрывных превращениях облака ГПВС позволяет для трудноформализуемых исходных данных о поведении газопарового облака горючего вещества в окружающем пространстве количественно оценивать последствия развития возможных аварий на прилегающей к потенциально опасному объекту территории по той или иной модели взрыва.

Используемая эмпирическая зависимость  $\omega \equiv k \cdot M^{1/6}$  оценивает диапазон «малых» скоростей (<100 м/с) распространения фронта пламени в облаке горючих газопаровоздушных смесей для малочувствительных к иницированию взрывных процессов веществ в слабо загроможденном или свободном пространстве, рис.5.1.

Здесь необходимо сделать ряд замечаний по поводу использования зависимости  $\omega = f(M)$ .

Во-первых, дефлаграционные процессы приводят к появлению воздушных ударных волн, обладающих поражающим действием только при видимых скоростях фронта пламени свыше 100 м/с, что соответствует максимальному избыточному давлению на фронте воздушной ударной волны  $\Delta P_{\max} \geq 15$  кПа. Выход на такие режимы сгорания наиболее вероятен при ограничении пространства или наличии препятствий [261].

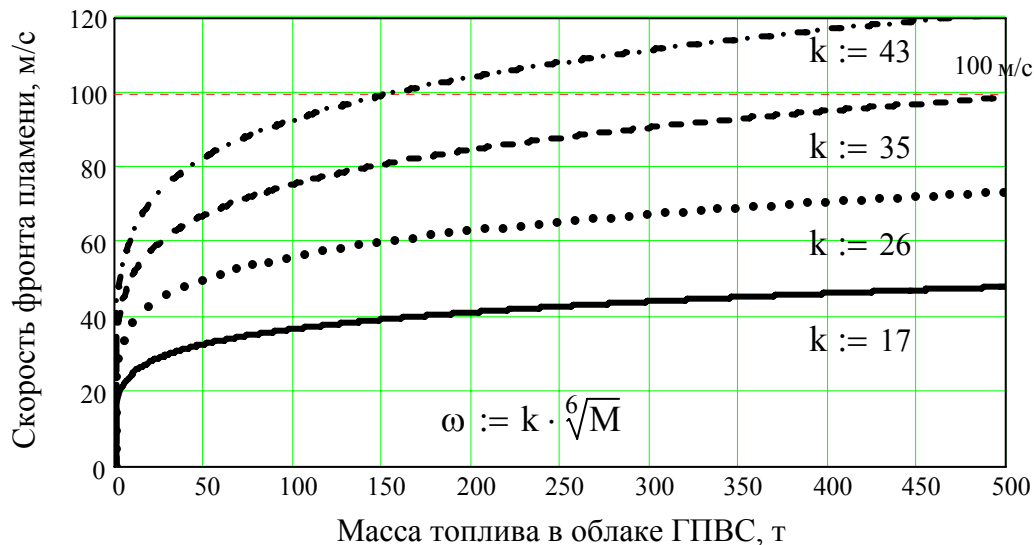


Рис.5.1. Изменение «малых» скоростей распространения фронта пламени в облаке ГПВС в зависимости от массы топлива в облаке

Во-вторых, при дефлаграционных взрывах максимальное избыточное давление на фронте воздушной ударной волны не зависит от количества (массы) взрывающейся ГПВС. Поэтому понятие тротилового эквивалента при дефлаграционном взрыве не имеет смысла [42].

## 2. Анализ методик оценки последствий детонационных взрывов

При детонации процесс горения в облаке ГПВС распространяется со сверхзвуковой скоростью, и после окончания детонации от границы облака взрыва также со сверхзвуковой скоростью начинает двигаться воздушная ударная волна (ВУВ).

Многие исследователи при рассмотрении детонационных взрывов облаков ГПВС пользуются понятием тротилового эквивалента, считая эти взрывы аналогичными взрыву твердых (конденсированных) взрывчатых веществ (ВВ). Однако такой подход лишь приближенно верен при больших расстояниях до взрыва и приводит к серьезным погрешностям в ближней зоне, так как в отличие от взрывов твердых ВВ, являющихся точечными, взрыв облака ГПВС является объемным [21].

Уравнение М.А. Садовского [185], изначально описывающее характер изменения избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  на фронте ВУВ при взрывах твердых ВВ, в ряде методик приспособлено для оценки последствий детонационных взрывов облаков ГПВС.

$$\Delta P_{\phi} = 100 \cdot \frac{\sqrt[3]{\alpha \cdot M_{\text{ГПВС}}}}{\Gamma} + 430 \cdot \frac{\sqrt[3]{(\alpha \cdot M_{\text{ГПВС}})^2}}{\Gamma^2} + 1400 \cdot \frac{\alpha \cdot M_{\text{ГПВС}}}{\Gamma^3}, \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{\phi} = P_0 \cdot \left( 0,8 \cdot \frac{M_{\text{пр}}^{0,33}}{\Gamma} + 3 \cdot \frac{M_{\text{пр}}^{0,66}}{\Gamma^2} + 5 \cdot \frac{M_{\text{пр}}}{\Gamma^3} \right), \\ M_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{сг}}}{Q_0} \cdot Z \cdot M_{\text{ГПВС}} \end{cases}, \quad (5.2)$$

где  $\Delta P_{\phi}$  – избыточное давление на фронте ВУВ, кПа;  $M_{\text{ГПВС}}$  – масса вещества, участвующего во взрыве, кг;  $\alpha$  – коэффициент эквивалентности ГПВС тротилу;  $P_0$  – атмосферное давление, кПа;  $M_{\text{пр}}$  – приведенная масса горючего вещества (тротильный эквивалент), кг;  $Q_{\text{сг}}$  – удельная теплота сгорания газа или пара, Дж/кг;  $Q_0 = 4,52 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $Z$  – коэффициент участия, принимаемый равным 0,1;  $\Gamma$  – расстояние от центра взрыва, м.

В уравнении (5.1), используемом в работах [52;177;202], масса вещества, участвующего во взрыве  $M_{\text{ГПВС}}$ , умножается на коэффициент  $\alpha$ , равный для ГПВС  $\alpha \approx 0,7 - 1,0$  в зависимости от состава смеси. При этом уравнение (5.1) справедливо для расстояний, где  $\Delta P_{\phi} \leq 500$  кПа.

Уравнение (5.2), предложенное Б.Е. Гельфандом и описанное в работах [45;55], также учитывает тротильный эквивалент взрыва газопаровоздушных смесей горючих веществ. Однако, в отличие от (5.1), уравнение (5.2) позволяет учесть вид горючего вещества, участвующего во взрыве, по его удельной теплоте сгорания. На рис.5.2 приведены графики изменения  $\Delta P_{\phi}$  в функции расстояния от центра взрыва облака ГПВС для уравнений (5.1) и (5.2), построенные в Mathcad 2000 Professional.

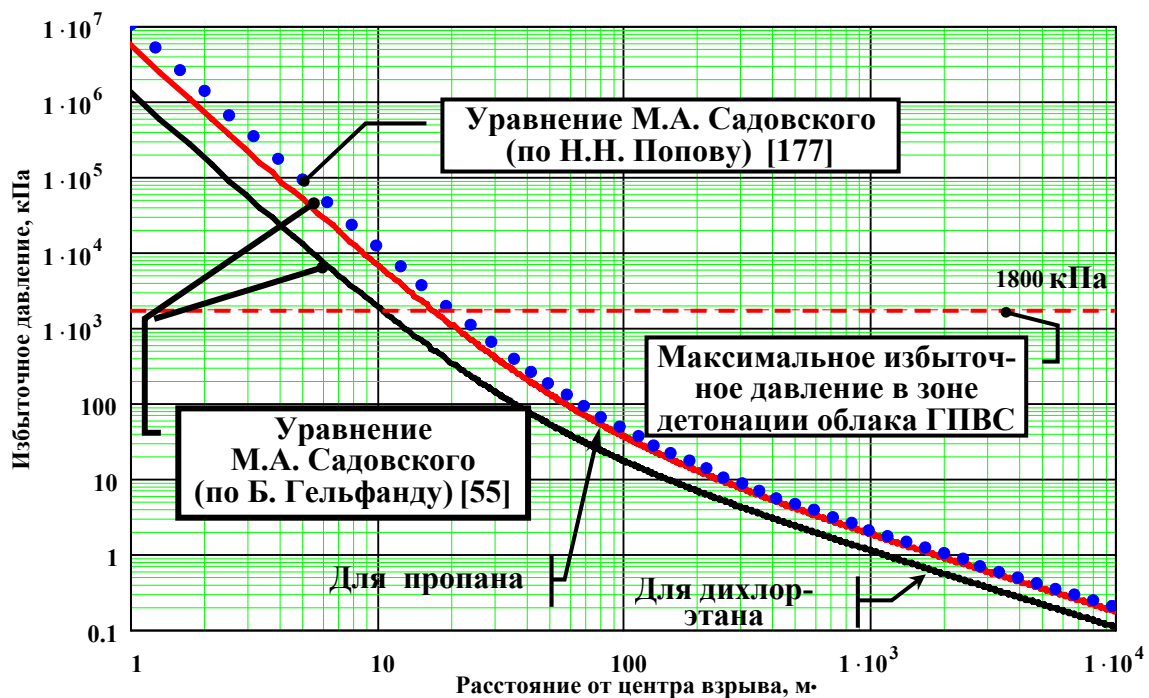


Рис.5.2. Изменение избыточного давления на фронте ВУВ в функции расстояния от центра взрыва облака ГПВС для различных моделей, представленных уравнениями (5.1) [177] и (5.2) [55]



Используемая для оценки последствий взрывов ГПВС в руководящем документе Госгортехнадзора России ПБ 09-170-97 [145] и работах [19;96] эмпирическая зависимость применяется в мировой практике для выбора безопасных расстояний от мест хранения бризантных ВВ. Данная зависимость получена зарубежными авторами на основе закона Хопкинсона в результате обширных исследований реальных разрушений зданий и сооружений при взрывах авиационных бомб во время Второй мировой войны [19;95;113] и имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma = \frac{K_p \cdot \sqrt[3]{W_{тр}}}{\left[ 1 + \left( \frac{3180}{W_{тр}} \right)^2 \right]^{1/6}}; \\ W_{тр} = \frac{0,4 \cdot q'}{0,9 \cdot q_T} \cdot z \cdot m, \end{array} \right. \quad (5.3)$$

где  $W_{тр}$  - тротиловый эквивалент взрыва ГПВС;  $K_p$  - константа соответствующего уровня разрушений; 0,4 - доля энергии взрыва парогазовой среды, затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны; 0,9 - доля энергии взрыва тринитротолуола (ТНТ), затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны;  $q'$  - удельная теплота сгорания парогазовой среды, кДж/кг;  $q_T$  - удельная теплота взрыва ТНТ, кДж/кг;  $m$  - приведенная масса парогазовых веществ, кг;  $z$  - доля приведенной массы парогазовых веществ, участвующих во взрыве.

В работах [19;96;145] приведены, для различных избыточных давлений, значения константы  $K_p$ , которые заимствованы у В. Маршалла [113], табл. 5.5.

Таблица 5.5

Уровни разрушений зданий и сооружений

По М.В. Бесчастнову [19]			По ПБ 09-170-97 [145] и по Н.М. Кочетову [96]		
Степень повреждений	$K_p$ *)	$\Delta P_{\phi}$ , кПа	Степень разрушений **)	$K_p$	$\Delta P_{\phi}$ , кПа
Полное разрушение	3,8-5,6	70	Полное разрушение	3,8	$\geq 100$
Тяжелые повреждения, здание подлежит сносу	5,6-9,6	33	Сильное разрушение, 50% полного разрушения	5,6	70
Средние повреждения, возможно восстановление здания	9,6-28	25	Средняя – разрушение зданий без обрушения	9,6	28
Разбито 90 % остекления	28-56	4	Умеренная - повреждение внутренних перегородок, рам, дверей	28	14
Разбито 50 % остекления	> 56	0,2	Малые повреждения – разбито не более 10 % остекления	56	2
Разбито 5 % остекления	> 56	0,05			

Примечание: \*) В работе В. Маршалла [113] подвергнута сомнению степень точности, с которой определяются радиусы зон разрушений на основе приведенных значений константы  $K_p$ .

\*\*) Степень разрушений для соответствующих  $K_p$  и  $\Delta P_{\phi}$  раскрыта в работе [96].

Однако, в работах [19;96;145] соотношение между радиусом разрушений  $\Gamma$  и соответствующими значениями избыточного давления  $\Delta P_\phi$  на фронте воздушной ударной волны в аналитическом виде не приведено, что затрудняет использование данных методик при квантификации рисков.

Для сравнительного анализа методик нами была предварительно, по данным табл.5.5, установлена функциональная связь  $\Delta P_\phi = f(K_p)$ , на основе линейной регрессии, выполненной в *STATGRAPHICS Plus v-3* для совокупности значений  $K_p$  и  $\Delta P_\phi$ . Затем, используя выражение (5.3), построены в *Mathcad 2000 Pro* графики зависимостей  $\Delta P_\phi = f(\Gamma)$ , рис.5.3.

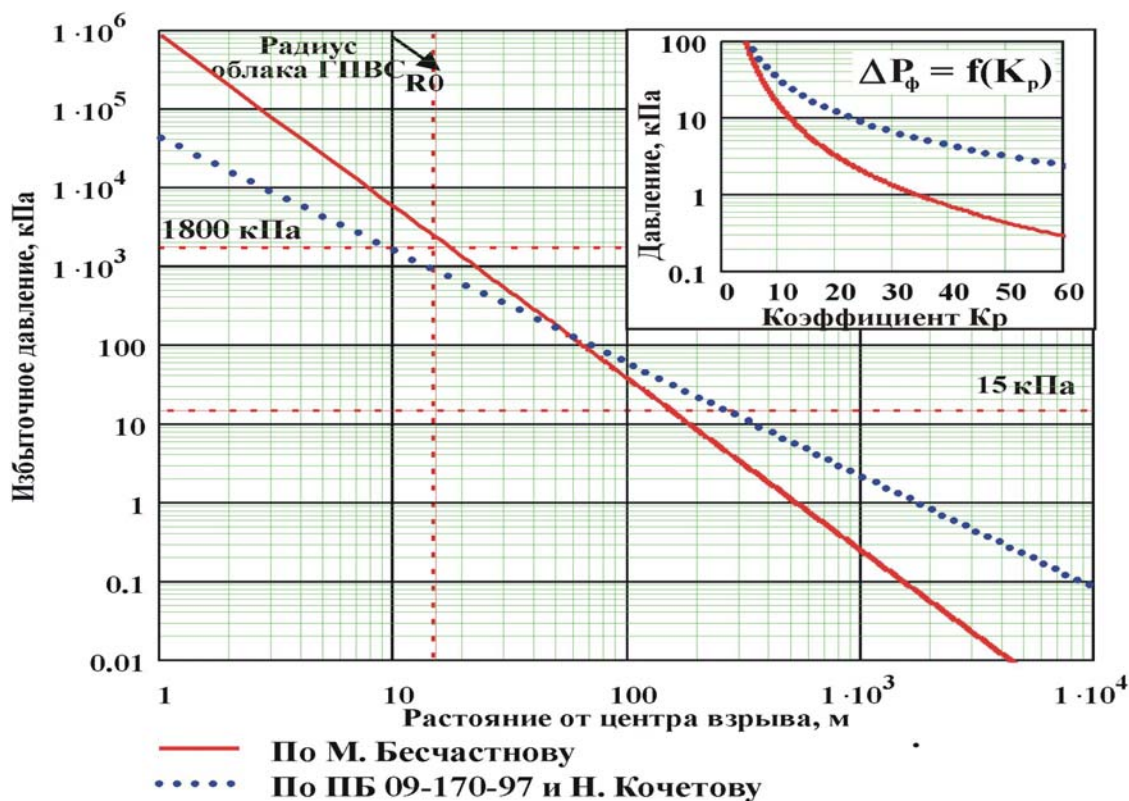


Рис.5.3. Зависимость избыточного давления от расстояния до центра взрыва для различных методик расчета

Здесь необходимо отметить, что описанная выше модель, в которой взрыв парового облака сравнивается со взрывом эквивалентного количества ТНТ, не способна представить явления, происходящие в ближней зоне объемного взрыва ГПВС [113].

Это обусловлено тем, что взрыву парового облака не свойственно бризантное действие, характерное для конденсированных ВВ. В непосредственной близости от места взрыва конденсированного ВВ давление может превысить 1 ГПа [243], в то время как максимальная величина избыточного давления взрыва ГПВС даже при наличии соответствующих условий не достигает и нескольких единиц МПа.

Существует достаточно доказательств, и теоретических, и эмпирических, приведенных в [95;113;242], согласно которым в результате детонацион-

ного взрыва парового облака уровень избыточного давления в ближней зоне не превысит  $1,8 \div 2$  МПа. Модель тротилового эквивалента, в которой избыточное давление в ближней зоне взрыва ГПВС не превышает указанной величины ( $1,8 \div 2,0$  МПа), предлагается в работах [63;95;186;224].

На рис. 5.4 показано изменение избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  от расстояния по модели взрыва ГПВС, описанной М.П. Цивилевым [224]. Однако в данной методике при входе в таблицу для расчета значений избыточных давлений на фронте ВУВ не учитываются энергетические характеристики газопаровоздушной смеси, что не позволяет связать полученные результаты со взрывом газопарового облака конкретного вещества.

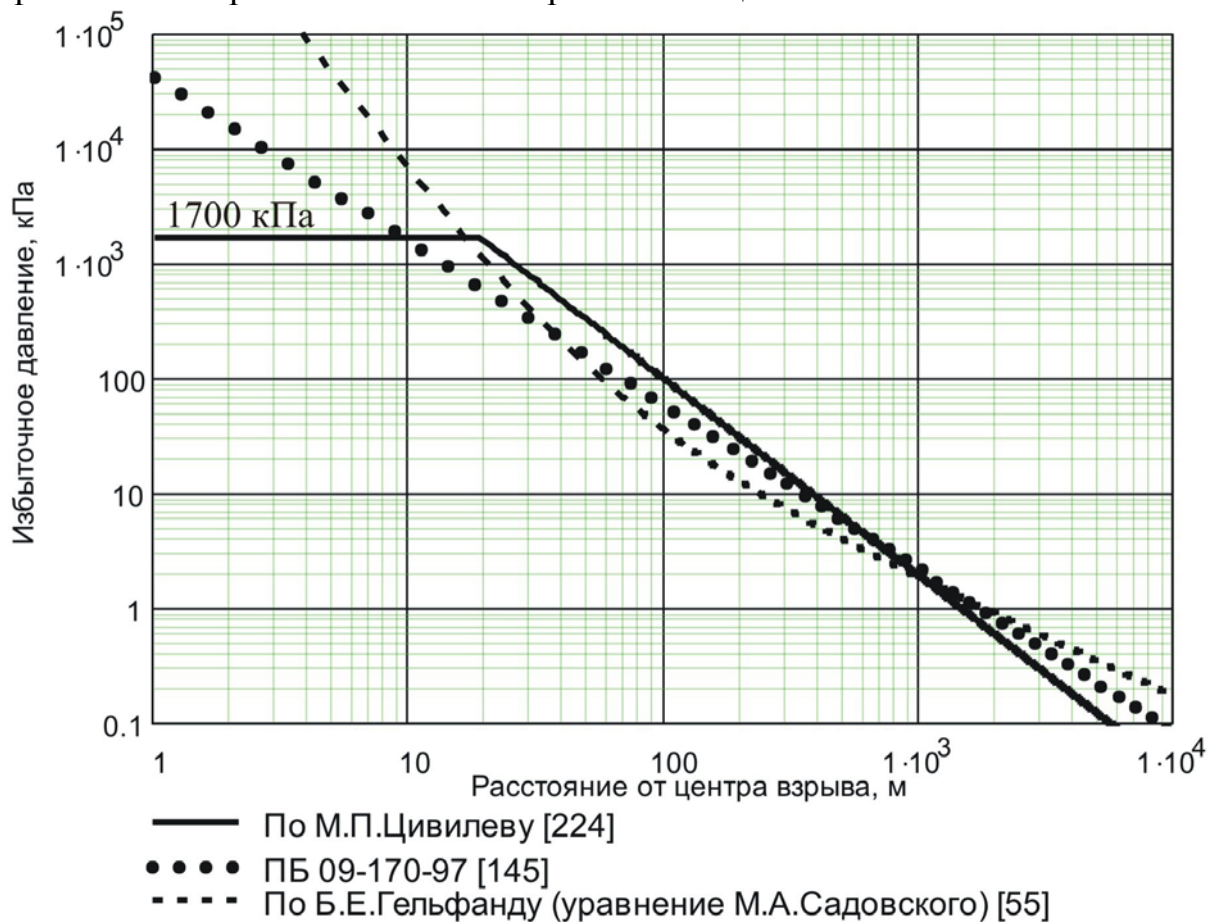


Рис.5.4. Изменение избыточного давления от расстояния до центра взрыва (сравнение методик М.П. Цивилева, ПБ 09-170-97 и Б.Е. Гельфанда)

Аналогичный недостаток и у аналитической методики, описанной Г.П. Демиденко [63]. Алгоритм расчета и график зависимости  $\Delta P_{\phi} = f(\Gamma)$  показаны на рис. 5.5. Данная методика позволяет с достаточной степенью точности оценивать последствия взрывов ГПВС только для многотонных аварийных выбросов опасного вещества, массой не менее 100 т.

$\Gamma = 0,1 ; 0,5 .. 10000$  м (диапазон изменения расстояний от центра взрыва)

$M = 100$  т (масса аварийного выброса сжиженного углеводородного газа)

$r_1 = 17,5 \cdot \sqrt[3]{M}$  м (радиус зоны детонационной волны)

$r_1 = 81,228$  м

$\Psi(\Gamma) = 0,24 \cdot \frac{\Gamma}{r_1}$  параметр изменения относительного расстояния от центра взрыва

$$\Delta P_{\text{д}}(\Gamma) = \begin{cases} 1700 & \text{if } \Psi(\Gamma) \leq 0,24 & \text{кПа (избыточное давление на фронте ВУВ)} \\ \frac{23,1075}{\Psi(\Gamma)^3} & \text{if } 0,24 < \Psi(\Gamma) \leq 0,455 \\ \frac{700}{3 \cdot \left( \sqrt{1 + 29,8 \cdot \Psi(\Gamma)^3} - 1 \right)} & \text{if } 0,455 < \Psi(\Gamma) \leq 2 \\ \frac{22}{\Psi(\Gamma) \cdot \sqrt{\log(\Psi(\Gamma), 10) + 0,158}} & \text{if } \Psi(\Gamma) > 2 \\ \Gamma & \text{otherwise} \end{cases}$$

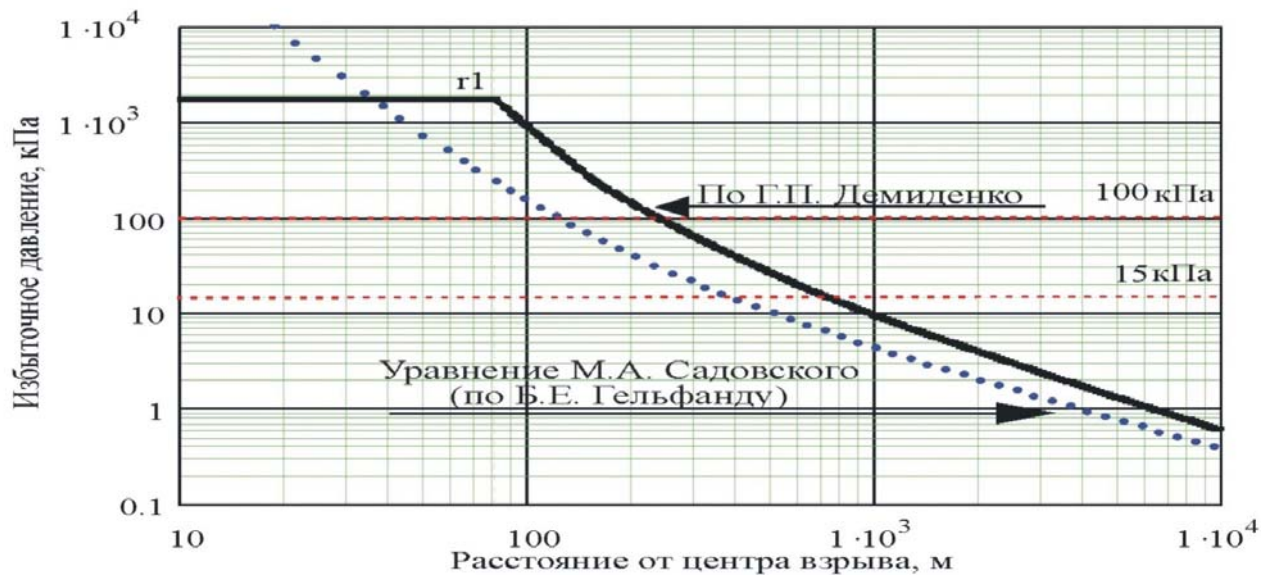


Рис. 5.5. Алгоритм расчета и график зависимости  $\Delta P_{\text{ф}} = f(\Gamma)$  по Г.П. Демиденко

Методика Госгортехнадзора России, предложенная НТЦ «Промышленная безопасность» [126], позволяет учитывать энергетические характеристики газопаровоздушной смеси, связывая последствия взрыва газопарового облака с конкретным потенциально опасным веществом, рис. 5.6.

Однако, в уравнении  $\Delta P_{\text{ф}} = f(\Gamma)$  уже при давлениях на фронте ВУВ менее 10 кПа преобладает квадратичная зависимость и график функции  $f(\Gamma)$  принимает форму параболы, никогда не пересекая уровни избыточных давлений 3-4 кПа, рис.5.6 и 5.7.

## Методика НТЦ «Промышленная безопасность» (детонационный взрыв)

Исходная информация: Вещество: тип - пропан; вид - СУГ.

Характер прилегающей территории - резервуарный парк  
 (средне загроможденное пространство)

$$С_{нпв} = 2,1 \quad С_{ст} = 4,03 \quad С_{нпв} < С_{ст} \quad \beta = 1,05 \quad q = 44 \cdot \beta \quad q = 46,2$$

$$P_0 = 1 \quad M = 5000 \quad \Gamma = 1, 10.. 10000$$

$$E = 2 \cdot M \cdot q \quad E = 4,62 \times 10^5 \text{ МДж} \quad \text{- энергозапас ГПВС}$$

$$\Gamma_x(\Gamma) = \frac{\Gamma}{\left(10 \cdot \frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad P_{x2}(\Gamma) = \exp\left[-1,124 - 1,66 \cdot \ln(\Gamma_x(\Gamma)) + 0,26 \cdot (\ln(\Gamma_x(\Gamma)))^2\right]$$

$$\Delta P(\Gamma) = \begin{cases} 1800 & \text{if } \Gamma_x(\Gamma) < 0,2 \\ 100 \cdot P_{x2}(\Gamma) \cdot P_0 & \text{if } \Gamma_x(\Gamma) \geq 0,2 \end{cases}$$

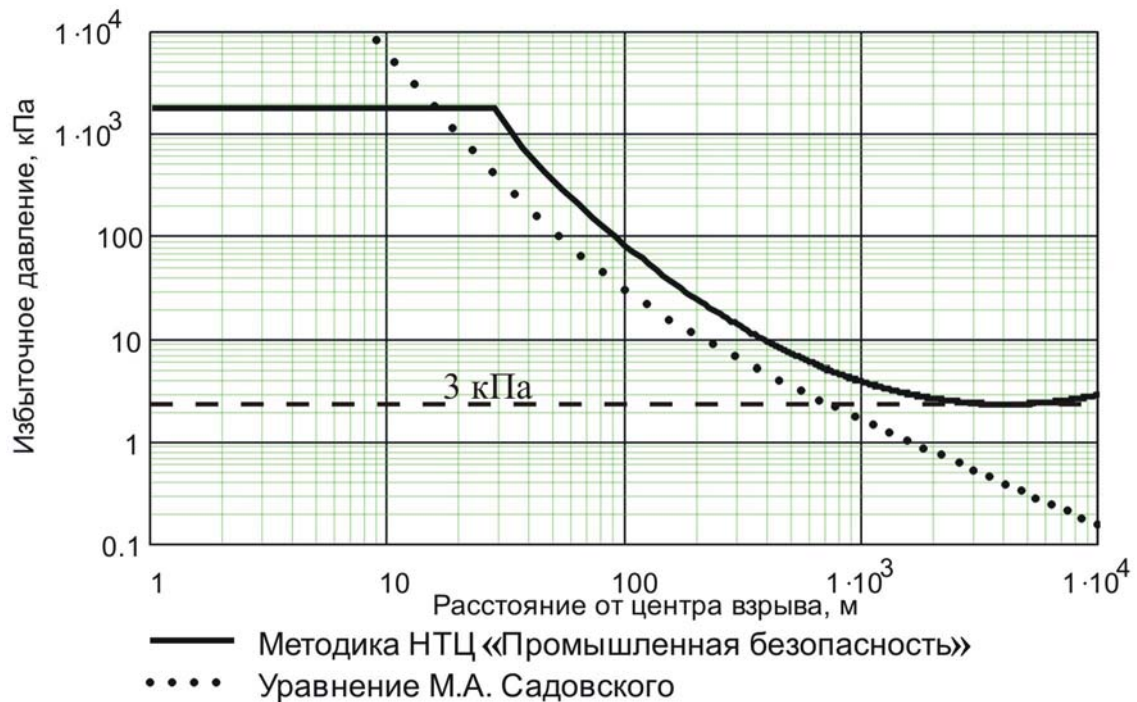


Рис. 5.6. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (детонационный взрыв), предложенная НТЦ «Промышленная безопасность» [126]

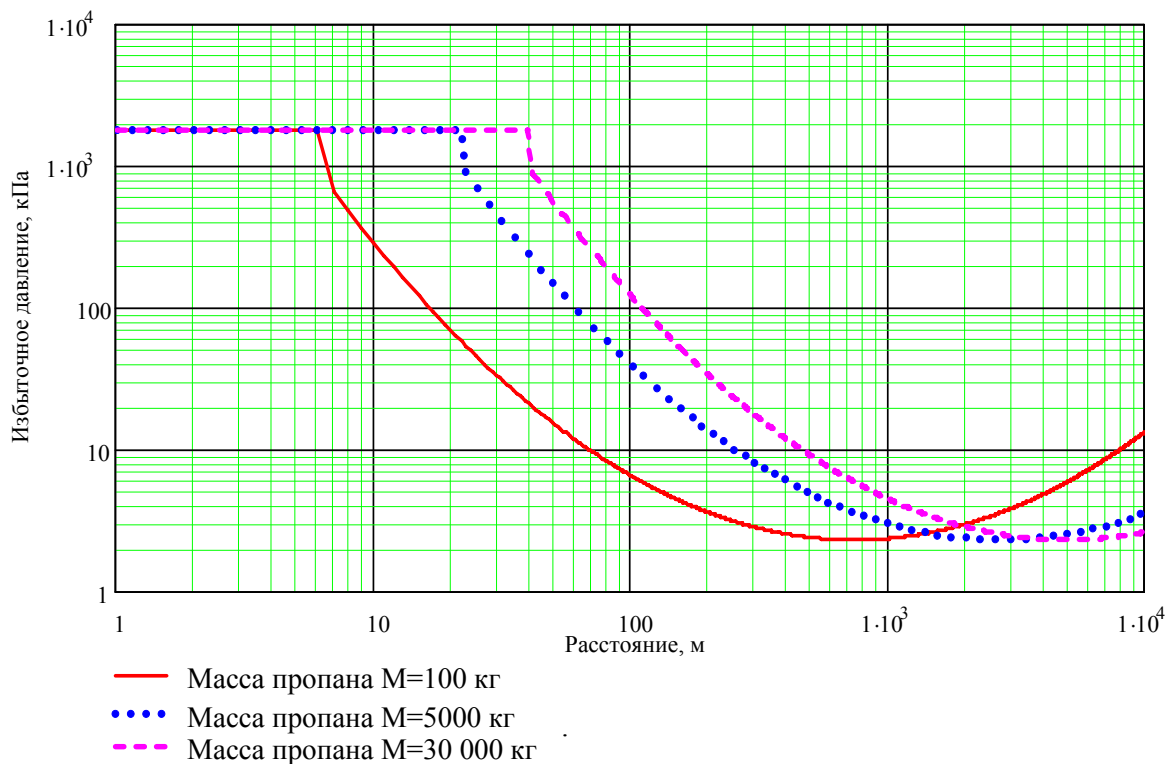


Рис. 5.7. Графики функции  $\Delta P_{\Phi} = f(\Gamma)$  детонационных взрывов ГПВС для различных по массе аварийных выбросов (методика НТЦ «Промышленная безопасность» [126])

Определенный интерес представляет методика, описанная А.Н. Бирбраером [21], для расчета давления на фронте воздушной ударной волны  $\Delta P_{\Phi}$  при детонационных взрывах газопаровоздушных смесей (ГПВС).

Данная методика адекватно отражает физическую картину детонационного взрыва, как в ближней, так и дальней зонах действия ударной волны и при расчетах  $\Delta P_{\Phi}$  позволяет более полно (в отличие от рассмотренных выше методик) учесть физико-химические и взрывоопасные свойства газопаровоздушной смеси вещества, а также объем взрывающейся смеси, определяемый концентрационными пределами воспламенения и массой вещества, участвующего в формировании облака.

Важно отметить, в данной методике учитывается тот факт, что параметры ударной волны на расстояниях, превышающих начальный размер облака ГПВС ( $\Gamma \geq r_0$ ), существенно зависят от величины приведенного расстояния  $\Gamma_{пр} = \Gamma / \sqrt[3]{2 \cdot E}$  (где  $\Gamma$  – расстояние от центра взрыва,  $E$  – энергия ВУВ) и определяются по формулам для соответствующего диапазона значений  $\Gamma_{пр}$ .

Алгоритм расчета избыточного давления на фронте воздушной ударной волны  $\Delta P_{\Phi}$  при детонационных взрывах газопаровоздушных смесей, выполненный авторами монографии в среде Mathcad 2000 по методике, описанной А.Н. Бирбраером, представлен на рис. 5.8.

**Методика по А.Н. БИРБРАЕРУ - детонационный взрыв,  
 авария с выбросом 10 т сжиженного пропана**

$$G = 10000 \text{ кг} \quad \mu = 44 \quad P_a = 101,3 \text{ кПа} \quad \rho_{\text{стх}} = 1,315 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \chi = 0,5$$

$$\text{Снкпд} = 2,57 \quad q_{\text{встх}} = 3676 \quad q_{\text{мстх}} = 2801 \quad \text{Сстх} = 4,03$$

$$\text{Снпв} = 2,1 \quad q_{\text{в}} = q_{\text{встх}} \cdot \frac{\text{Снкпд}}{\text{Сстх}} \quad q_{\text{м}} = \frac{q_{\text{встх}}}{\rho_{\text{стх}}} \quad V = \frac{2240 \cdot \chi \cdot G}{\mu \cdot \text{Снкпд}}$$

$$r_0 = \text{ceil}(0,78 \cdot \sqrt[3]{V}) \quad V = 9,904 \times 10^4 \text{ м}^3 \quad \text{- объем облака ГПВС}$$

$$r_0 = 37 \text{ м} \quad \text{- радиус облака ГПВС}$$

$$k = \frac{1,3}{1,85 \cdot 10^{-5} \cdot (q_{\text{м}} - 1200) + 1} \quad \eta = 1 - \left[ \frac{202,6}{2,586 \cdot q_{\text{м}} \cdot (k - 1)} \right]^{\frac{k-1}{k}}$$

$$E = \eta \cdot q_{\text{в}} \cdot V \quad E = 8,644 \times 10^7 \text{ кДж} \quad \text{- энергия взрыва, перешедшая в энергию ВУВ}$$

$$\Delta P_{\text{дет}} = 2,586 \cdot (k - 1) \cdot q_{\text{м}} - P_a \quad \xi = \sqrt[3]{2 \cdot E}$$

$$\Delta P_{\text{дет}} = 1,798 \times 10^3 \text{ кПа} \quad \text{- избыточное давление на фронте детонационной волны} \quad \Gamma_{\text{пр}}(\Gamma) = \frac{\Gamma}{\sqrt[3]{2 \cdot E}}$$

$$\Delta P_{\text{ф}}(\Gamma) = \begin{cases} \Delta P_{\text{дет}} & \text{if } \Gamma \leq 0,05 \cdot \xi \\ \frac{1,227 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{\Gamma}{\xi}\right)^{4,68}} + 50 & \text{if } 0,05 \cdot \xi < \Gamma \leq 0,068 \cdot \xi \\ \frac{4,156}{\left(\frac{\Gamma}{\xi}\right)^{1,7}} & \text{if } 0,068 \cdot \xi < \Gamma \leq 0,31 \cdot \xi \\ \frac{4,96}{\frac{\Gamma}{\xi}} + \frac{0,974}{\left(\frac{\Gamma}{\xi}\right)^2} + \frac{0,146}{\left(\frac{\Gamma}{\xi}\right)^3} & \text{if } \Gamma > 0,31 \cdot \xi \\ \Gamma & \text{otherwise} \end{cases}$$

- (кПа) избыточное давление на фронте воздушной ударной волны (ВУВ)

Рис. 5.8. Алгоритм расчета детонационного взрыва по методике А.Н. Бирбраера, реализованный авторами монографии в среде Mathcad 2000

Графики зависимости  $\Delta P_{\text{ф}} = f(\Gamma)$  для методик А.Н. Бирбраера, НТЦ «Промышленная безопасность» и уравнения М.А. Садовского приведены на рис. 5.9.

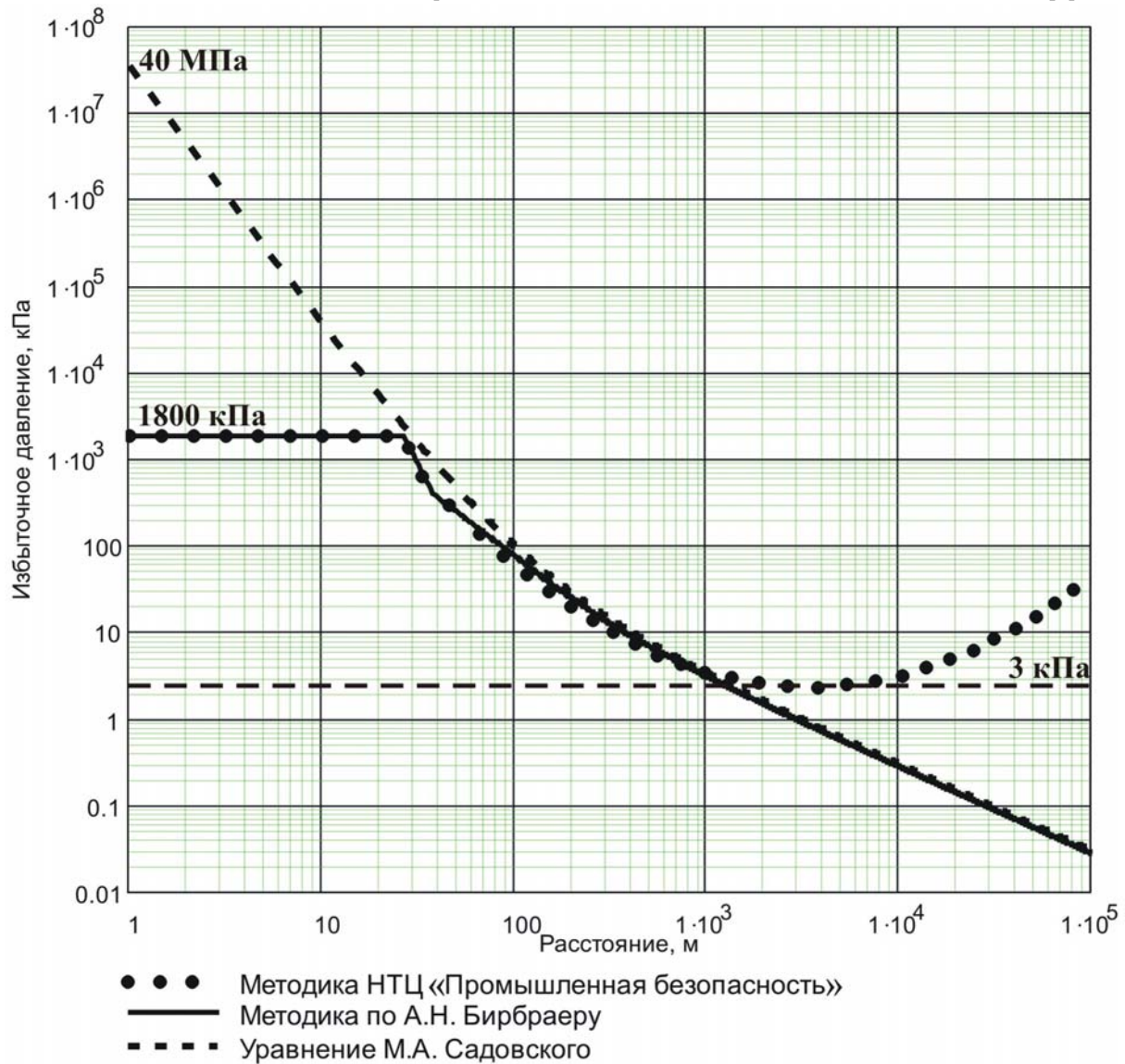


Рис.5.9. Графики зависимости  $\Delta P_{\Phi} = f(\Gamma)$  для методик А.Н. Бирбраера, НТЦ «Промышленная безопасность» и уравнения М.А. Садовского

Как видно из рис. 5.9, графики  $\Delta P_{\Phi} = f(\Gamma)$  в методиках А.Н. Бирбраера и НТЦ «Промышленная безопасность» совпадают в ближней и средней зонах, а в дальней зоне методика НТЦ «Промышленная безопасность» не адекватна реальным процессам изменения параметров ударной волны. Уравнение М.А. Садовского, изначально предназначенное для оценки параметров взрыва твердых взрывчатых веществ, значительно завышает величины избыточных давлений в ближней и средней зонах действия ВУВ и приближенно верно для больших расстояний до центра взрыва.

Рассмотрим более подробно процесс формирования графиков  $\Delta P_{\Phi} = f(\Gamma)$  в методиках по А.Н. Бирбраера и НТЦ «Промышленная безопасность».

В методике НТЦ «Промышленная безопасность»  $\Delta P_{\Phi}$  получена в результате перемножения трех функций  $\Delta P_{\Phi} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$ , где  $F_1 = \exp(-1,124)$ ;





$$\Delta P_{\text{дет.}} = \begin{cases} \Gamma \leq 0,05 \cdot \xi \\ \frac{1,227 \cdot 10^{-3}}{\Gamma_{\text{пр}}^{4,68}} + 50 & \text{if } 0,05 \cdot \xi < \Gamma \leq 0,068 \cdot \xi \\ \frac{4,156}{\Gamma_{\text{пр}}^{1,7}} & \text{if } 0,068 \cdot \xi < \Gamma \leq 0,31 \cdot \xi \\ \frac{4,96}{\Gamma_{\text{пр}}} + \frac{0,974}{\Gamma_{\text{пр}}^2} + \frac{0,146}{\Gamma_{\text{пр}}^3} & \text{if } \Gamma > 0,31 \cdot \xi \end{cases}, \quad (5.4)$$

$$\xi = \sqrt[3]{2 \cdot E}$$

Процесс формирования графика зависимости  $\Delta P_{\text{ф}} = f(\Gamma)$  для методики по А.Н. Бирбраеру показан на рис.5.11.

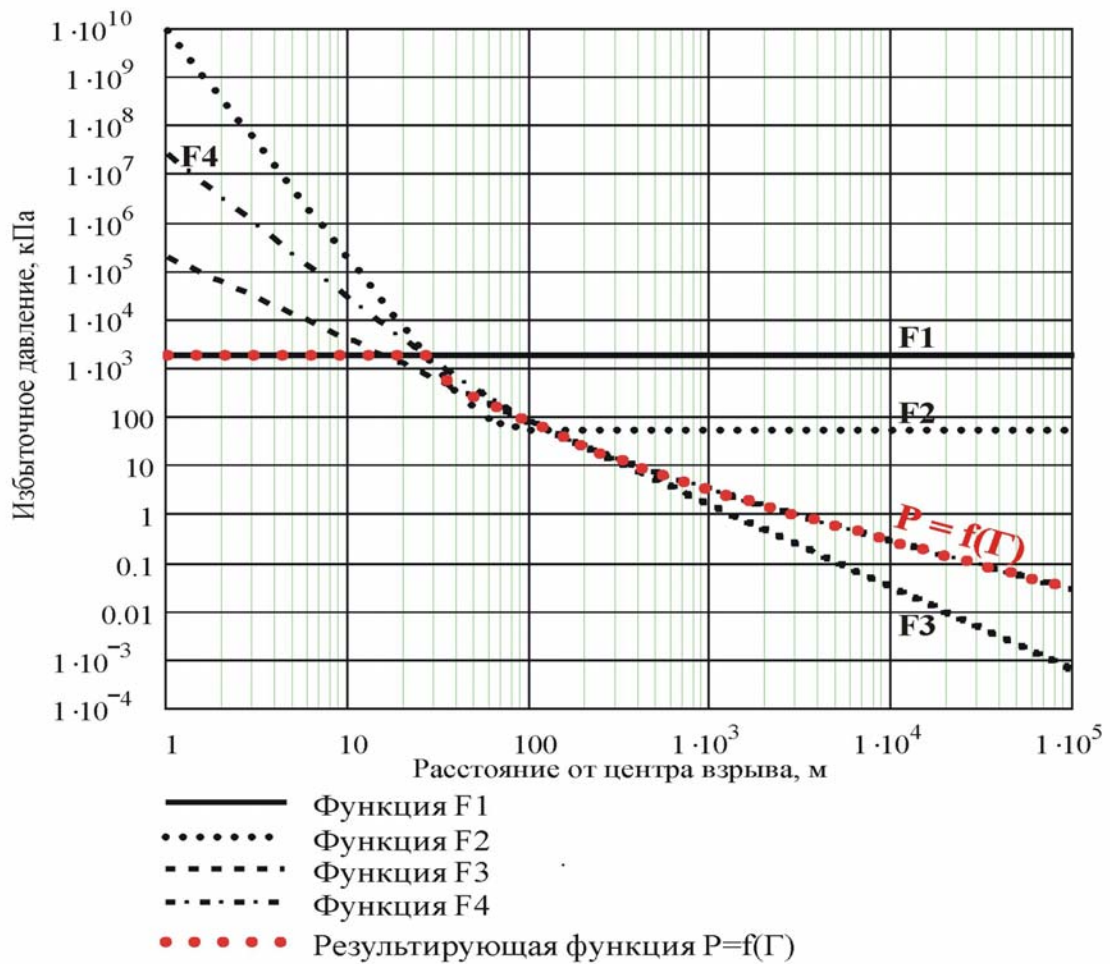


Рис.5.11. Последовательность формирования графика зависимости  $\Delta P_{\text{ф}} = f(\Gamma)$  в методике по А.Н. Бирбраеру

### 3. Анализ методик оценки последствий дефлаграционных взрывов

При дефлаграционных взрывах, наблюдающихся в облаках ГПВС, скорость распространения пламени по веществу меньше звуковой и может изменяться в широких пределах. Существенно различаются и характеристики взрывного сгорания в режиме детонации и режиме дефлаграции. В «ближней» к эпицентру взрыва зоне дефлаграционное избыточное давление, даже в случае околосвуковых скоростей горения, значительно (на порядок) ниже давления, создаваемого при детонации. Однако продолжительность действия избыточного давления при дефлаграции значительно больше, чем при детонации, причем период отрицательной фазы (до 100 мс и более) в 2 – 5 раз превышает период положительной фазы. Такое нагружение ближе к статическому и может оказаться опаснее для строительных конструкций, чем более интенсивная, но кратковременная нагрузка при детонационном взрыве.

Следует особо подчеркнуть, что согласно многочисленным экспериментам, а также материалам исследований промышленных аварий [21;95;186], в эволюционирующем по направлению ветра облаке ГПВС в «открытых», неограниченных пространствах, даже при их сильных «загромождениях», режим горения протекает со скоростью, не превышающей околосвуковую скорость ( $\approx 250 \div 300$  м/с), без эффекта разгона фронта пламени с последующим переходом к детонации.

Теория сферического дефлаграционного взрыва в открытом пространстве разработана А.К. Трошиным, В.А. Горевым, Д.З. Хуснутдиновым [42;223]. Методики расчета параметров дефлаграционного взрыва газопаровоздушных смесей описаны в работах [21;90;95;121;126;186].

Для расчета давления на фронте воздушной ударной волны  $\Delta P_{\Phi}$  при дефлаграционных взрывах газопаровоздушных смесей представляют определенный интерес рекомендации МАГАТЭ (№50–SG–D5, №50–SG–S5) по прогнозированию последствий внешних взрывов ГПВС [206;207].

Данные рекомендации обобщены и модифицированы для инженерных расчетов, с учетом аналитических зависимостей [21;42;95;223], в работах Саратовского регионального отделения Российской экологической академии (СРО РЭА) [9;90].

Модифицированная методика адекватно отражает физическую картину дефлаграционного взрыва, как в ближней, так и дальней зонах действия ударной волны и при расчетах  $\Delta P_{\Phi}$  позволяет более полно (в отличие от методик [121;126;186]) учесть физико-химические и взрывоопасные свойства газопаровоздушной смеси вещества, а также объем взрывающейся смеси, определяемый концентрационными пределами воспламенения и массой вещества, участвующего в формировании облака, в зависимости от метеорологических условий (скорости приземного ветра, температуры воздуха) и эффек-

тивности использования локализирующих систем, определяющих время испарения жидкости с зеркала разлития:

- Радиус начального облака [21;95]

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{\mu} \cdot \chi \cdot G_{\Gamma}}{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot C_{\text{НКПВ}}}}, \quad (5.5)$$

где  $r_0$  – радиус начального полусферического облака ГПВС;  $V_{\mu}$  – молярный объем вещества (при нормальных условиях – 0 °С и давлении 101,3 кПа);  $G_{\Gamma}$  – масса горючего вещества, участвующего в формировании облака;  $C_{\text{НКПВ}}$  – объемный нижний концентрационный предел воспламенения смеси;  $\chi$  – коэффициент, зависящий от вида и способа хранения вещества;  $\mu$  – относительная молекулярная масса.

- Масса горючего вещества, участвующего в формировании облака

$$G_{\Gamma} = \frac{Q(t,h)}{\eta \cdot \rho} \cdot \sigma(T,v) \cdot \tau, \quad (5.6)$$

где  $Q(t,h)$  – масса аварийного выброса за время  $t$ ;  $\sigma(T,v)$  – интенсивность испарения жидкости с единицы поверхности зеркала разлития в зависимости от температуры окружающего воздуха ( $T$ ) и скорости приземного ветра ( $v$ );  $\tau$  – время испарения жидкости с зеркала разлития;  $\eta$  – толщина слоя разлившейся жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости.

- Интенсивность испарения жидкости с единицы поверхности определяется эмпирической зависимостью (формула Мацака) [200]

$$\sigma(T,v) = 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot (5,38 + 4,1 \cdot v) \cdot \sqrt{\mu} \cdot p(T) \cdot \frac{k_2}{k_1}, \quad (5.7)$$

где  $\mu$  – относительная молекулярная масса;  $p(T)$  – парциальное давление паров жидкости;  $v$  – скорость приземного ветра;  $k_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий снижение температуры поверхности жидкости при испарении;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения (при открытой поверхности испарения  $k_2 = 1$ ).

- Радиус облака сгоревших паров [21;95]

$$r_H = r_0 \cdot \sqrt[3]{4 + 4 \frac{C_{\text{НКПВ}}}{C_{\text{СТХ}}}}, \quad (5.8)$$

где  $r_H$  – радиус облака сгоревших паров;  $C_{\text{СТХ}}$  – стехиометрическая концентрация.

- Безразмерная скорость распространения пламени [21;95]:

$$\alpha = \frac{V_{\Gamma}}{w_0} \Big|_{w_0=340\text{м/с}}, \quad (5.9)$$

где  $\alpha$  – безразмерная скорость распространения пламени;  $V_{\Gamma}$  – скорость фронта пламени, зависящая от многих факторов, в том числе от условий рас-

пространства – степени загроможденности пространства;  $w_0$  - скорость звука в воздухе.

- Максимальное давление на фронте волны [9]:

$$\Delta P_m = \begin{cases} 2,1 \cdot \frac{P_a \cdot \alpha^2}{1 + \alpha} & \text{if } \alpha < 0,7 \\ A \cdot P_a \cdot \alpha^\xi & \text{if } \alpha \geq 0,7 \end{cases}, \quad (5.10)$$

где  $A$  и  $\xi$  - аппроксимирующие коэффициенты;  $P_a$  – атмосферное давление.

- Изменение давления на фронте волны в зависимости от расстояния  $\Gamma$  до центра взрыва определяется, с учетом формулы Д.З. Хуснутдинова [21], следующим соотношением:

$$\Delta P_\Phi(\Gamma) = \begin{cases} \Delta P_m & \text{if } \Gamma \leq r_H \\ \frac{\Delta P_m}{1 + B \cdot \left[ \left( \frac{\Gamma}{r_H} - 1 \right) \cdot \Phi \left( \frac{\Gamma}{r_H} - 1 \right) \right]^C} & \text{if } \Gamma > r_H \\ \Gamma & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5.11)$$

где  $\Delta P_\Phi(\Gamma)$  – избыточное давление на фронте воздушной ударной волны;

$\Phi \left( \frac{\Gamma}{r_H} - 1 \right)$  – функция Хевисайда.

- Параметрические коэффициенты  $B = f(\alpha)$  и  $C = f(\alpha)$  регрессионной модели  $\Delta P_\Phi = f(\Gamma)$  [9], полученные экстраполяцией аппроксимирующих коэффициентов Д.З. Хуснутдинова [223] для численного решения  $\Delta P_\Phi(\Gamma)$ , с привлечением функции предсказания из математического пакета Mathcad 2000, рис.5.12

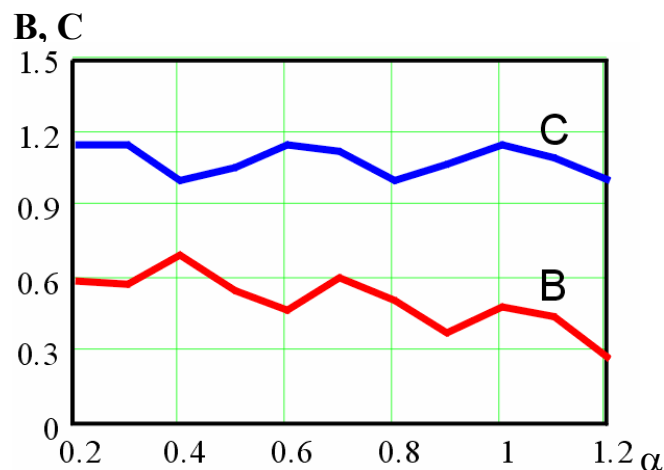


Рис.5.12. График функциональной зависимости параметрических коэффициентов  $B$  и  $C$  от параметра  $\alpha$

Приведем, в качестве примера расчетов, сравнительный анализ описанной инженерной методики, применяемой в СРО РЭА [9;90] и методики

оценки последствий дефлаграционных взрывов НТЦ «Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России [126]:

### 1. Методика НТЦ «Промышленная безопасность»

$C_{\Gamma}$  - концентрация газа в смеси, %об;  $C_{ст}$  - стехиометрическая концентрация, %об;  $M_{\Gamma}$  - масса газа, кг;  $V_{\Gamma}$  - скорость фронта пламени, м/с;  $w_0$  - скорость звука в воздухе, м/с;  $\Gamma$  - расстояние от центра облака, м;  $\beta$  - корректировочный параметр;  $q$  - теплота сгорания МДж/кг;  $\sigma_H$  - степень расширения продуктов сгорания;  $E$  - эффективный энергозапас горючей смеси, МДж;  $\Gamma_x(\Gamma)$  - безразмерный радиус;  $\Delta P_{нтц}(\Gamma)$  - избыточное давление на фронте ВУВ в функции расстояния, кПа;  $P_0$  - атмосферное давление, атм;  $P_a$  - атмосферное давление, кПа.

$$C_{\Gamma} = 9,45 \text{ \%об} \quad C_{ст} = 9,45 \text{ \%об} \quad M_{\Gamma} = 13600 \quad \rho = 0,72 \quad V_{\Gamma} = 120 \quad w_0 = 340 \quad \sigma_H = 7$$

$$P_0 = 1 \text{ атм} \quad P_a = 101,3 \text{ кПа} \quad \beta = 1,14 \quad q = 44 \cdot \beta \quad \Gamma = 10, 20.. 2500$$

$$E = 2 \cdot M_{\Gamma} \cdot q \cdot \frac{C_{ст}}{C_{\Gamma}} \quad E = 1,364 \times 10^6 \text{ МДж} \quad \Gamma_x(\Gamma) = \frac{\Gamma}{\left(10 \cdot \frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$P_{x1}(\Gamma) = \left(\frac{V_{\Gamma}^2}{w_0^2}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_H - 1}{\sigma_H}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{\Gamma_x(\Gamma)} - \frac{0,14}{\Gamma_x(\Gamma)^2}\right) \quad \Gamma_{кр} = 0,34$$

$$\Delta P_{нтц}(\Gamma) = \begin{cases} P_a \cdot \left(\frac{V_{\Gamma}^2}{w_0^2}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_H - 1}{\sigma_H}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{\Gamma_{кр}} - \frac{0,14}{\Gamma_{кр}^2}\right) & \text{if } \Gamma_x(\Gamma) < \Gamma_{кр} \\ P_a \cdot P_{x1}(\Gamma) \cdot P_0 & \text{if } \Gamma_x(\Gamma) \geq \Gamma_{кр} \end{cases}$$

### 2. Методика, применяемая в СРО РЭА - дефлаграционный взрыв

$S_{нпв}$  - нижний предел воспламенения, %об;  $C_{стx}$  - стехиометрическая концентрация, %об;  $G_{\Gamma}$  - масса газа, участвующего в формировании облака, кг;  $\mu$  - относительная молекулярная масса;  $\rho_{стx}$  - плотность стехиометрической смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $P_a$  - атмосферное давление, кПа;  $\chi$  - коэффициент, зависящий от вида и способа хранения вещества;  $V_{\Gamma}$  - скорость фронта пламени, м/с;  $w_0$  - скорость звука в воздухе, м/с;  $\Gamma$  - расстояние от центра облака, м;  $\alpha$  - безразмерная скорость распространения пламени;  $C, B$  - параметры регрессионной модели изменения величины избыточного давления от расстояния.

$G\Gamma = 13600$  кг  $\mu = 16$   $C_{стх} = 9,45$   $C_{нпв} = 5$   $\rho_{стх} = 1,232$   $P_a = 101,3$  кПа  
 $\chi = 1$   $V_{\Gamma} = 120$  м/с  $w_0 = 340$  м/с  $B = 0,567$   $C = 1,146$   $\Gamma = 10, 20.. 2500$  м

$$r_0 = 0,781 \cdot \sqrt[3]{\frac{22,1 \cdot \chi \cdot G\Gamma}{0,01 \cdot \mu \cdot C_{нпв}}} \quad \sigma = 4 + 4 \cdot \frac{C_{нпв}}{C_{стх}} \quad \sigma = 6,116 \quad \alpha = \frac{V_{\Gamma}}{w_0} \quad \alpha = 0,353 \quad r_H = r_0 \cdot \sqrt[3]{\sigma}$$

$r_0 = 56,355$  м - радиус начального облака ГПВС

$r_H = 103,062$  м - радиус облака сгоревших газов

$$\Delta P_m = \begin{cases} 2,1 \cdot \frac{P_a \cdot \alpha^2}{1 + \alpha} & \text{if } \alpha < 0,7 \\ A \cdot P_a \cdot \alpha^{\xi} & \text{if } \alpha \geq 0,7 \end{cases}$$

$\Delta P_m = 16,482$  кПа

$$\Delta P_{\Phi}(\Gamma) = \begin{cases} \Delta P_m & \text{if } \Gamma \leq r_H \\ \frac{\Delta P_m}{1 + B \cdot \left[ \left( \frac{\Gamma}{r_H} - 1 \right) \cdot \Phi \left( \frac{\Gamma}{r_H} - 1 \right) \right]^C} & \text{if } \Gamma > r_H \\ \Gamma & \text{otherwise} \end{cases}$$

Таблица 5.6

Изменения избыточного давления на фронте ВУВ в функции расстояния

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Gamma$ , м	100	150	200	250	300	350	400	450	725	775	825
$\Delta P_{РЭА}$ , кПа	16,5	13,1	10,5	8,6	7,3	6,3	5,5	4,8	2,9	2,7	2,52
$\Delta P_{НТЦ}$ , кПа	12,8	10,5	8,6	7,2	6,2	5,4	4,8	4,3	2,8	2,6	2,47

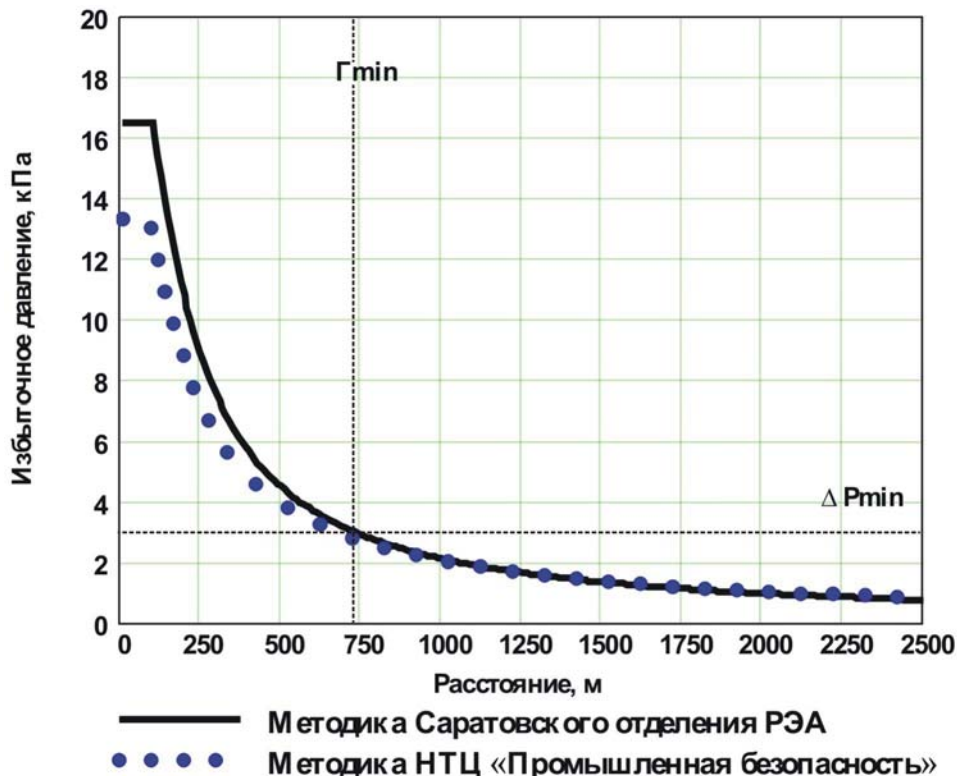


Рис. 5.13. Изменение избыточного давления на фронте воздушной ударной волны в функции расстояния от центра газоздушного облака

Как видно из табл.5.6 и рис. 5.13, величины избыточных давлений  $\Delta P_{РЭА} = f(\Gamma)$  и  $\Delta P_{НТЦ} = f(\Gamma)$  близки по значению в средней и дальней зонах действия ВУВ. Однако в ближней зоне, в пределах облака сгоревших газов  $r_n$ , максимальные избыточные давления различаются почти в 1,5 раза,  $\Delta P_{mРЭА} > \Delta P_{mНТЦ}$ .

Это обосновывается различием в подходах к получению зависимости избыточного давления от расстояния. В методике НТЦПБ функция  $\Delta P_{НТЦ} = f(\Gamma)$  конструируется с использованием трех функций – двух гиперболических

$$\left[ \frac{0,83}{\Gamma x(\Gamma)} - \frac{0,14}{[\Gamma x(\Gamma)]^2} \right] \text{ и } P_m = \text{const}, \text{ рис.5.14.}$$

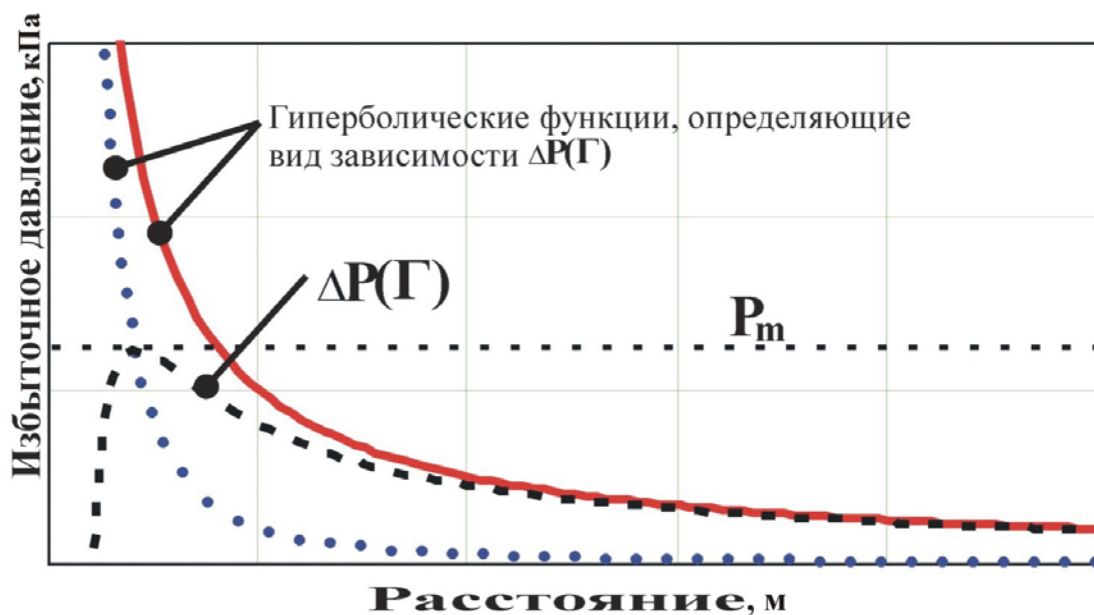


Рис. 5.13. Построение функциональной зависимости  $\Delta P_{НТЦ} = f(\Gamma)$  по методике НТЦ «Промышленная безопасность»

В методике, применяемой в СРО РЭА, используется функциональная зависимость избыточного давления от расстояния  $\Delta P_{РЭА} = f(\Gamma)$ , полученная аппроксимацией численного решения  $\Delta P(\Gamma)$  [223] с привлечением методов нелинейной регрессии и экстраполирующей функции предсказания математического пакета Mathcad 2000 [9]. Сравнение последовательности построения функциональной зависимости  $\Delta P = f(\Gamma)$  по методике, применяемой в СРО РЭА и НТЦ «Промышленная безопасность», показано на рис. 5.15.

Основываясь на проведенном анализе, можно предположить, что более реалистичны, на наш взгляд, уравнения, аппроксимирующие численное решение задачи о дефлаграции паровоздушных смесей [21;42;223], на основе которых построена инженерная методика для оценки дефлаграционных взрывов, применяемая в СРО РЭА [9;90].



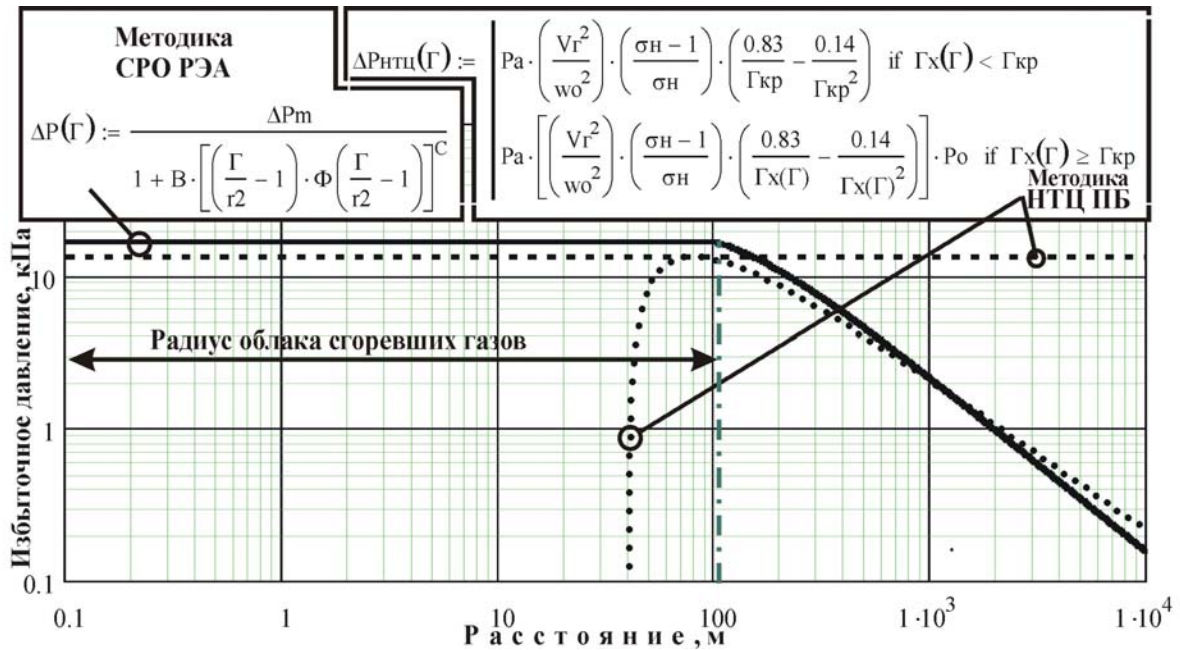


Рис. 5.15. Сравнение последовательности построения функциональной зависимости  $\Delta P_{\phi} = f(\Gamma)$  по инженерной методике, применяемой в СРО РЭА, и методике НТЦ «Промышленная безопасность»

### Выводы к главе 5

На основе проведенного сравнительного анализа существующих методик оценки аварийных взрывов газопаровоздушных смесей можно констатировать:

1. Методики для расчета детонационных взрывов ГПВС на основе тротилового эквивалента (ПБ 09-170-97 [145], по Б.Е. Гельфанду [55], НПБ 107-97 [143], ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ [45],) не адекватно отражают процесс формирования избыточного давления в детонирующем облаке и на фронте воздушной ударной волны, значительно завышая (на несколько порядков)  $\Delta P_{\phi}$  в ближней и средней зонах поражения и только приближенно верны на больших расстояниях от центра взрыва. Это обосновывается тем, что характер формирования взрывной волны отличается при взрывах твердых (конденсированных) взрывчатых веществ (ВВ) и взрывном горении облака ГПВС, так как в отличие от взрывов твердых ВВ, являющихся точечными, взрыв облака ГПВС является объемным [21]. В связи с этим их параметры в том и другом случаях будут существенно различаться.

2. Методика НТЦ «Промышленная безопасность» [126] для детонационных взрывов ГПВС не адекватно отражает процесс формирования избыточного давления в дальней зоне очага взрыва, так как в уравнении  $\Delta P_{\phi} = f(\Gamma)$  уже при давлениях на фронте ВУВ менее 10 кПа преобладает квадратичная зависимость и график функции  $f(\Gamma)$  принимает форму параболы, никогда не пересекая уровни избыточных давлений 3 – 4 кПа.

В табл.5.7 приведено сравнение зависимости  $\Delta P_{\Phi} = f(\Gamma)$  методики НТЦ

«Промышленная безопасность» ( $\Delta P_{\Phi}^{\text{НТЦ}}$ ) и методики по

А.Н. Бирбраеру ( $\Delta P_{\Phi}^{\text{Б.А.Н.}}$ ) с уравнением М.А. Садовского ( $\Delta P_{\Phi}^{\text{С.М.А.}}$ ) по степени их сходимости (метрикам) S1 и S2:

$$S1 = \left| \Delta P_{\Phi}^{\text{НТЦ}} - \Delta P_{\Phi}^{\text{С.М.А.}} \right|; S2 = \left| \Delta P_{\Phi}^{\text{Б.А.Н.}} - \Delta P_{\Phi}^{\text{С.М.А.}} \right| \quad (5.12)$$

Как видно из табл.5.7, метрика S2 функций  $\Delta P_{\Phi}^{\text{Б.А.Н.}}$  и  $\Delta P_{\Phi}^{\text{С.М.А.}}$  в каждой точке множества их значений уменьшается с возрастанием расстояния  $\Gamma$  от центра взрыва и составляет в дальней зоне очага взрыва не более 0,03 кПа. Выше нами было обосновано различие функций  $\Delta P_{\Phi}^{\text{Б.А.Н.}}$  и  $\Delta P_{\Phi}^{\text{С.М.А.}}$  в ближней и средней зоне очага взрыва и удовлетворительное их совпадение в дальней зоне.

В свою очередь, расхождение функций  $\Delta P_{\Phi}^{\text{НТЦ}}$  и  $\Delta P_{\Phi}^{\text{С.М.А.}}$  с расстоянием увеличивается. Метрика S1, достигнув наименьшего своего значения 0,1 кПа в средней

зоне, на расстоянии 1 км от центра взрыва, начинает возрастать, и в дальней зоне, на расстоянии 5 км, достигает значения 1,8 кПа, а на расстоянии 100 км величина S1 составляет уже 40 кПа. Сказанное наглядно иллюстрирует рис.5.16.

3. В этой связи, методика, описанная А.Н. Бирбраером в [21], на наш взгляд, наиболее адекватно отражает физическую картину детонационного взрыва, как в ближней, так и в дальней зонах действия ударной волны и при расчетах  $\Delta P_{\Phi}$  позволяет более полно (в отличие от рассмотренных выше методик) учесть физико-химические и взрывоопасные свойства газопаровоздушной смеси вещества, а также объем взрывающейся смеси, определяемый концентрационными пределами воспламенения и массой вещества участвующего в формировании облака. Важно отметить, в данной методике учитывается тот факт, что параметры ударной волны на расстояниях, превышающих начальный размер облака ГПВС ( $\Gamma \geq r_0$ ) существенно зависят от величины приведенного расстояния ( $\Gamma_{\text{пр}}$ ), и, как следствие, расчетные формулы для избыточного давления на фронте воздушной ударной волны варьируются в зависимости от диапазона значений  $\Gamma_{\text{пр}}$ .

4. Для решения практических задач промышленной безопасности и расчета рисков последствий развития аварий на взрывоопасных объектах

Таблица 5.7

	Г, м	S1, кПа	S2, кПа
1	200	9.205	3.611
2	400	2.456	0.949
3	600	0.958	0.487
4	800	0.289	0.317
5	1·10 <sup>3</sup>	0.101	0.232
6	1.2·10 <sup>3</sup>	0.361	0.182
7	1.4·10 <sup>3</sup>	0.552	0.149
8	1.6·10 <sup>3</sup>	0.701	0.126
9	1.8·10 <sup>3</sup>	0.823	0.109
10	2·10 <sup>3</sup>	0.925	0.096
11	2.2·10 <sup>3</sup>	1.015	0.086
12	2.4·10 <sup>3</sup>	1.094	0.078
13	2.6·10 <sup>3</sup>	1.166	0.071
14	2.8·10 <sup>3</sup>	1.232	0.065
15	3·10 <sup>3</sup>	1.293	0.06
16	3.2·10 <sup>3</sup>	1.351	0.056
17	3.4·10 <sup>3</sup>	1.405	0.052
18	3.6·10 <sup>3</sup>	1.458	0.049
19	3.8·10 <sup>3</sup>	1.508	0.046
20	4·10 <sup>3</sup>	1.556	0.044
21	4.2·10 <sup>3</sup>	1.603	0.041
22	4.4·10 <sup>3</sup>	1.649	0.039
23	4.6·10 <sup>3</sup>	1.694	0.037
24	4.8·10 <sup>3</sup>	1.738	0.036
25	5·10 <sup>3</sup>	1.781	0.034

техносферы можно рекомендовать для детонационных взрывов методику, описанную А.Н. Бирбраером в [21].

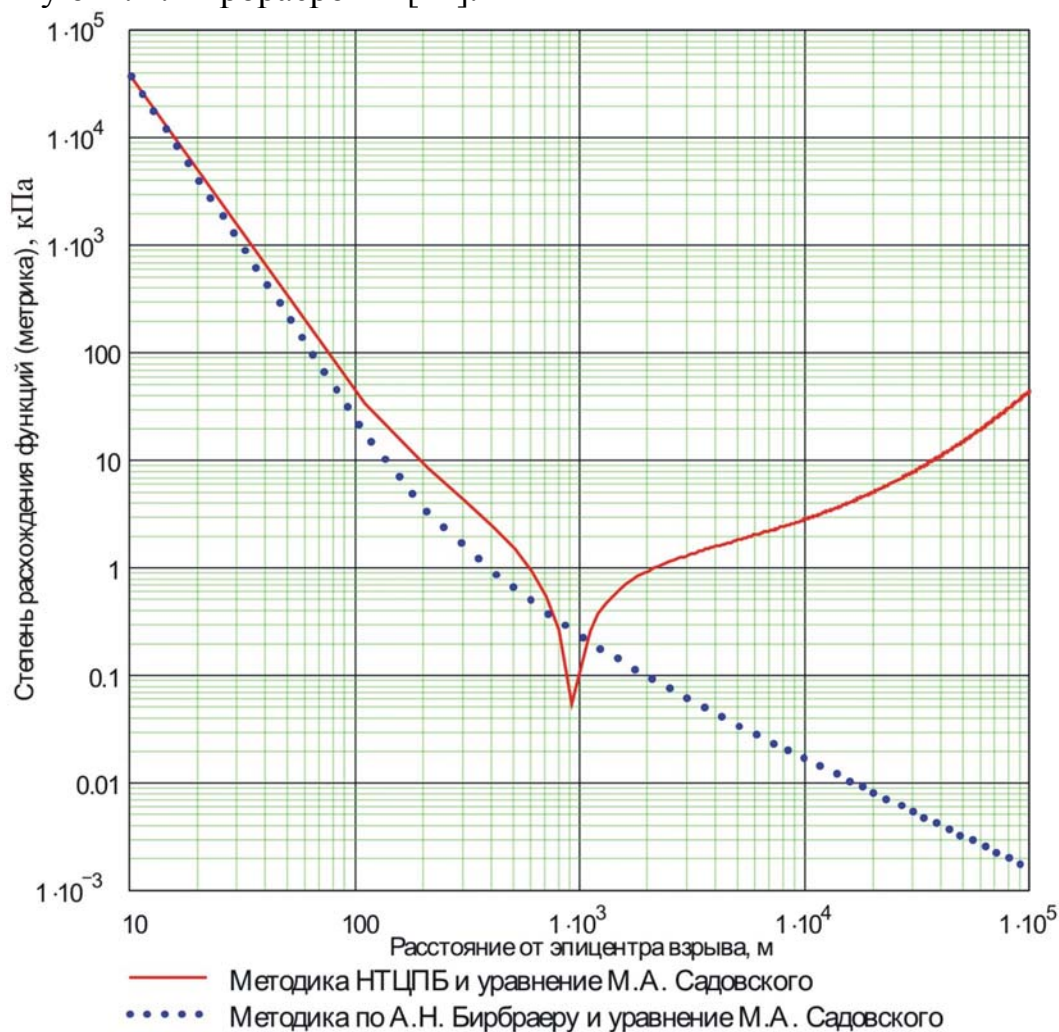


Рис. 5.16. Степень расхождения методики НТЦ «Промышленная безопасность» и методики по А.Н. Бирбраеру с уравнением М.А. Садовского в зависимости от расстояния до центра взрыва

5. Методику НТЦ «Промышленная безопасность» для детонационных взрывов ГПВС [126], также можно использовать для оценок последствий взрывов, но только в ближней и средней зонах очага взрыва, при условии введения ограничений по расстоянию.

6. Для практических расчетов дефлаграционных взрывов ГПВС можно рекомендовать методику НТЦ «Промышленная безопасность», а также модифицированную для инженерных расчетов, с учетом аналитических зависимостей [21;42;95;223], методику Саратовского регионального отделения Российской экологической академии (СРО РЭА) [9;90].