



ГРУППА КОМПАНИЙ

ПРОМЫШЛЕННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ

Группа компаний «Промышленная безопасность» (НП ПБ-ГРУПП)
Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности (ЗАО НТЦ ПБ)
Агентство исследований промышленных рисков (АНО АИПР)

Оценка риска при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений на территории ОПО

Дегтярев Денис Владиславович,
тел.: (495) 620-47-50; e-mail: ddv@safety.ru

Москва 14.10.2013

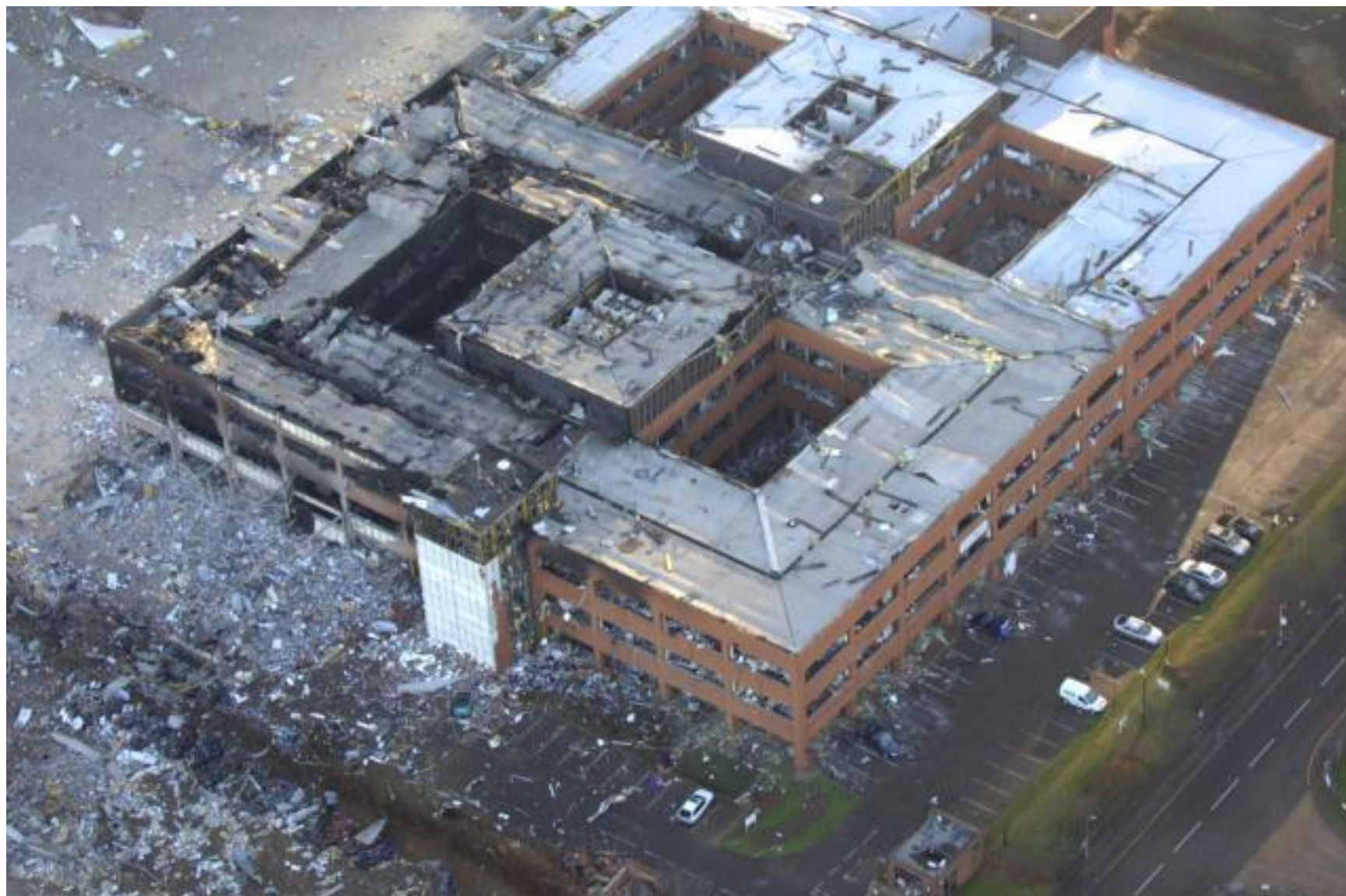


Фликсборо (01.06.1974)





Бансфилд (13.12.2005)





Бансфилд (13.12.2005)





Уэст (17.04.2013)





Уэст (17.04.2013) – 300 м от эпицентра





Тексас-Сити (24.03.2005)





Тексас-Сити (24.03.2005)





Актуальность обоснования взрывобезопасности

ФНП «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (утв. приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 г. № 96, рег. в Минюсте РФ 16 апреля 2013 г)

6.7.5. Размещение анализаторных помещений (зданий) на площадке технологической установки (цеха) обосновывается в проектной документации в соответствии с требованиями законодательства о градостроительной деятельности, настоящих Правил. Анализаторные помещения (здания) должны сохранять **устойчивость при воздействии ударной волны**, возникающей при аварийных взрывах на технологических установках;

10.4 Здания, в которых расположены помещения управления (операторные), должны быть **устойчивыми к воздействию ударной волны**, обеспечивать безопасность находящегося в них персонала и иметь автономные средства обеспечения функционирования систем контроля, управления, ПАЗ для перевода технологических процессов в безопасное состояние в аварийной ситуации;

2.1. Разработка технологического процесса, разделение технологической схемы производства на отдельные технологические блоки, применение технологического оборудования, ... должны быть обоснованы в проектной документации результатами анализа опасностей технологических процессов, ... с использованием методов анализа риска аварий на ОПО, и должны обеспечивать минимальный уровень взрывоопасности технологических блоков, входящих в технологическую систему.



Обоснование взрывобезопасности

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (утв. Ростехнадзором 11.03.2013 N 96, рег. Минюстом РФ 16.04.2013 №28138)

Принципиально новым является внедрение положений о проведении:

анализа опасностей технологических процессов (HAZID / HAZOP , КОР)
(Приложение 1)

анализа риска взрыва, в том числе для обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений, основанных на применении более точных методик последствий взрыва ТВС (РД 03-26-2007, РД 03-409-01) и вероятностных критериев разрушения зданий и гибели людей *(Приложение 3)*.

Индивидуальный риск для *i*-го человека или риска разрушения *i*-го здания:

$$R_i = \sum_{j=1}^G q_{ji} \cdot P(j)$$



Оценка параметров взрывной волны

РД 03-409-01, Методика определения расчетных величин пожарного риска

детонация облака газовой ТВС

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26 (\ln(R_x))^2 \pm 10\%$$
$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898 \ln(R_x) - 0,009 (\ln(R_x))^2 \pm 15\%$$

детонация гетерогенной ТВС

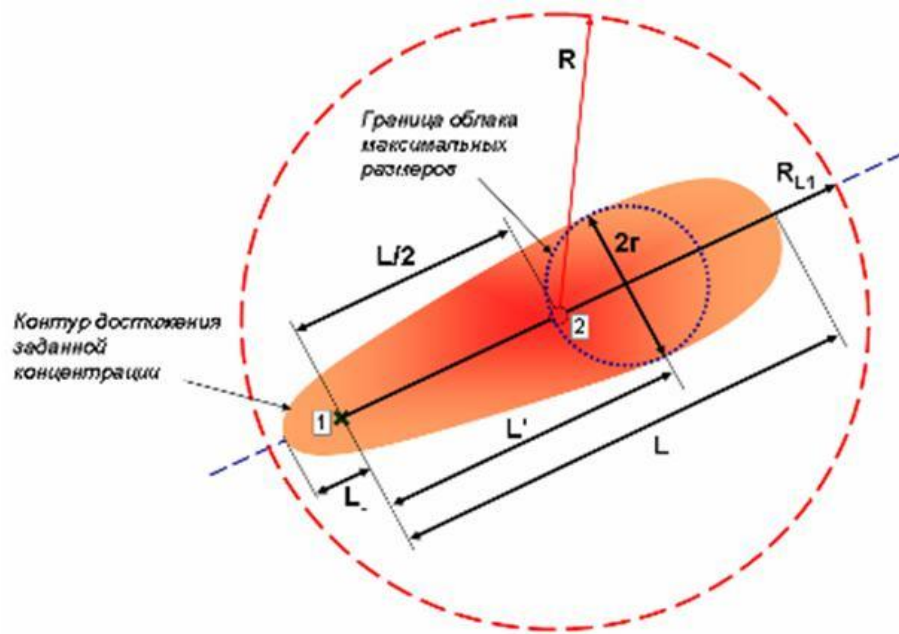
$$P_x = 0,125 / R_x + 0,137 / R_x^2 + 0,023 / R_x^3 \pm 10\%$$
$$I_x = 0,022 / R_x \pm 15\%$$

дефлаграция

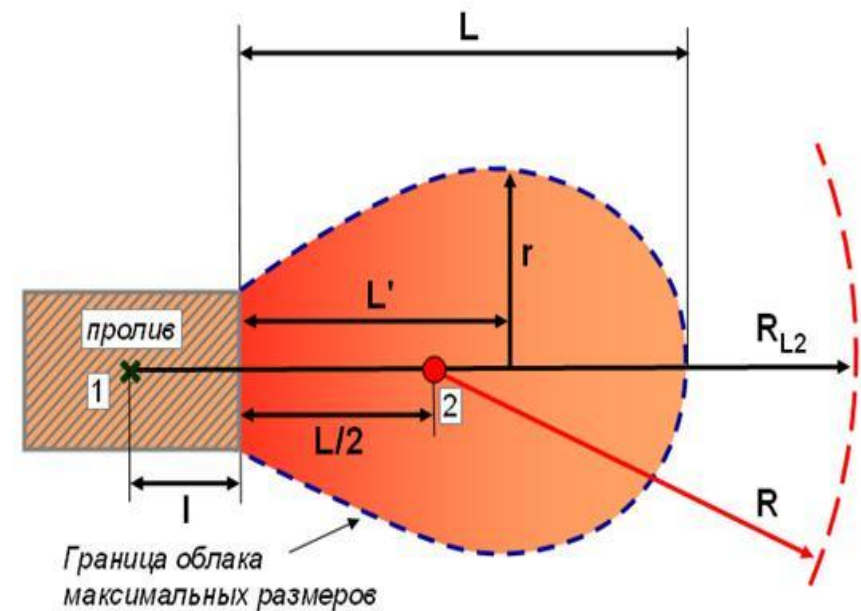
$$P_{x1} = (V_z / C_0)^2 ((\sigma - 1) / \sigma) (0,83 / R_x - 0,14 / R_x^2)$$
$$I_{x1} = (V_{\bar{a}} / C_0)^2 ((\sigma - 1) / \sigma) (1 - 0,4(\sigma - 1) V_{\bar{a}} / \sigma \tilde{N}_0) (0,06 / R_x + 0,01 / R_x^2 - 0,0025 / R_x^3)$$



Дрейф облака (РД 03-26-2007)



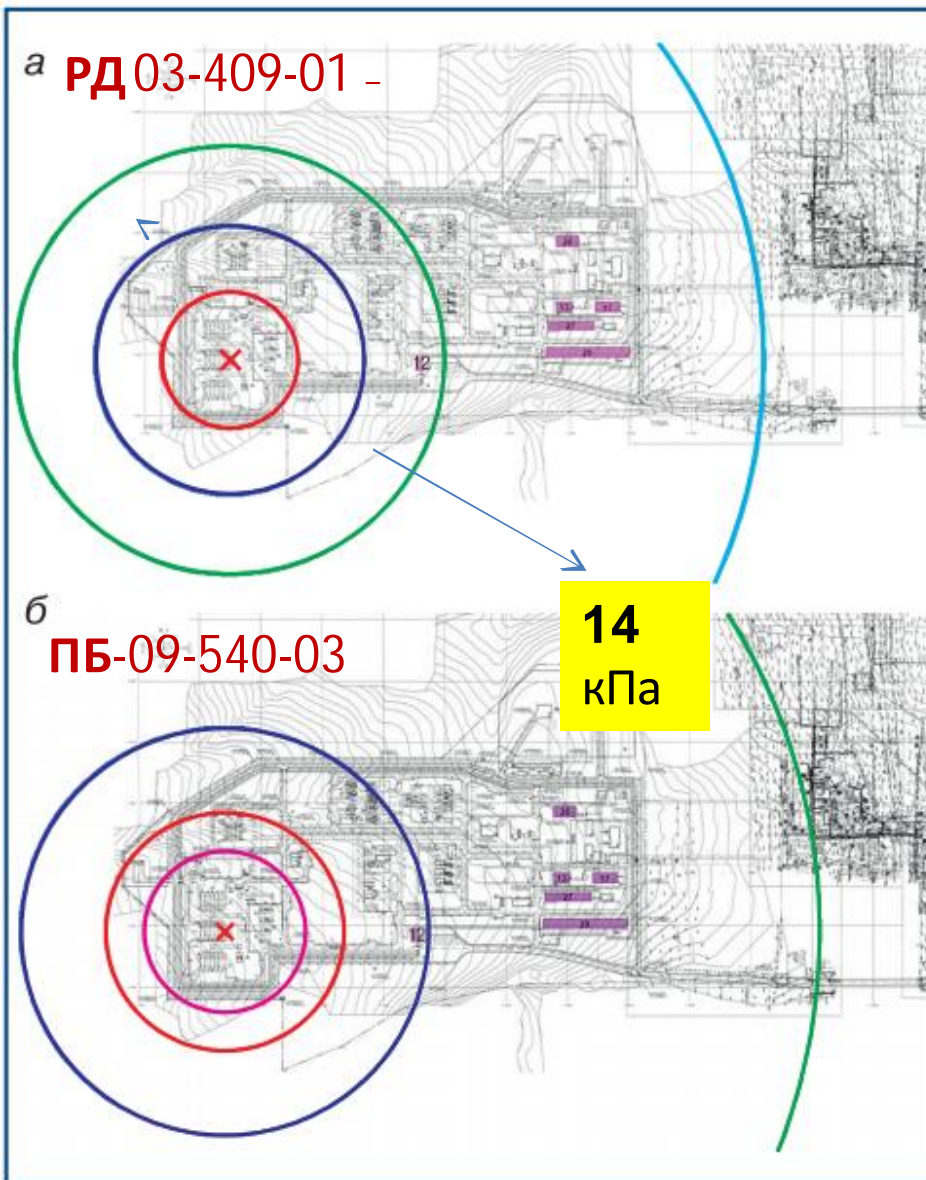
распространение первичного и вторичного облаков ТВС при аварийном выбросе вскипающих жидкостей



распространение вторичного облака ТВС при аварийном выбросе и испарении из пролива стабильных жидкостей



Сравнение зон разрушения при взрыве ТВС на УПГ



Повреждение	Радиус рассчитанной зоны поражения (разрушения), м		Δ, %	Обозначение на рис. 4
	РД 03-409-01	ПБ 09-540-03		
Сильное повреждение всех зданий ($\Delta P_{\Phi} > 100$ кПа)	Н. д.	132	-	
Среднее повреждение зданий с массивными обвалами ($\Delta P_{\Phi} = 70$ Па)	111	195	76	
Среднее повреждение промзданий ($\Delta P_{\Phi} = 28$ кПа)	219	339	55	
Разрушение оконных проемов ($\Delta P_{\Phi} = 14$ кПа)	350	974	178	
Частичное разрушение остекления, нижний порог повреждения человека волной давления ($\Delta P_{\Phi} = 5$ кПа)	870	-	-	

Рис. 4. Ситуационный план сценария аварии со взрывом ТВС при полном разрушении емкости V-601A-R:

а — расчет по РД 03-409—01;

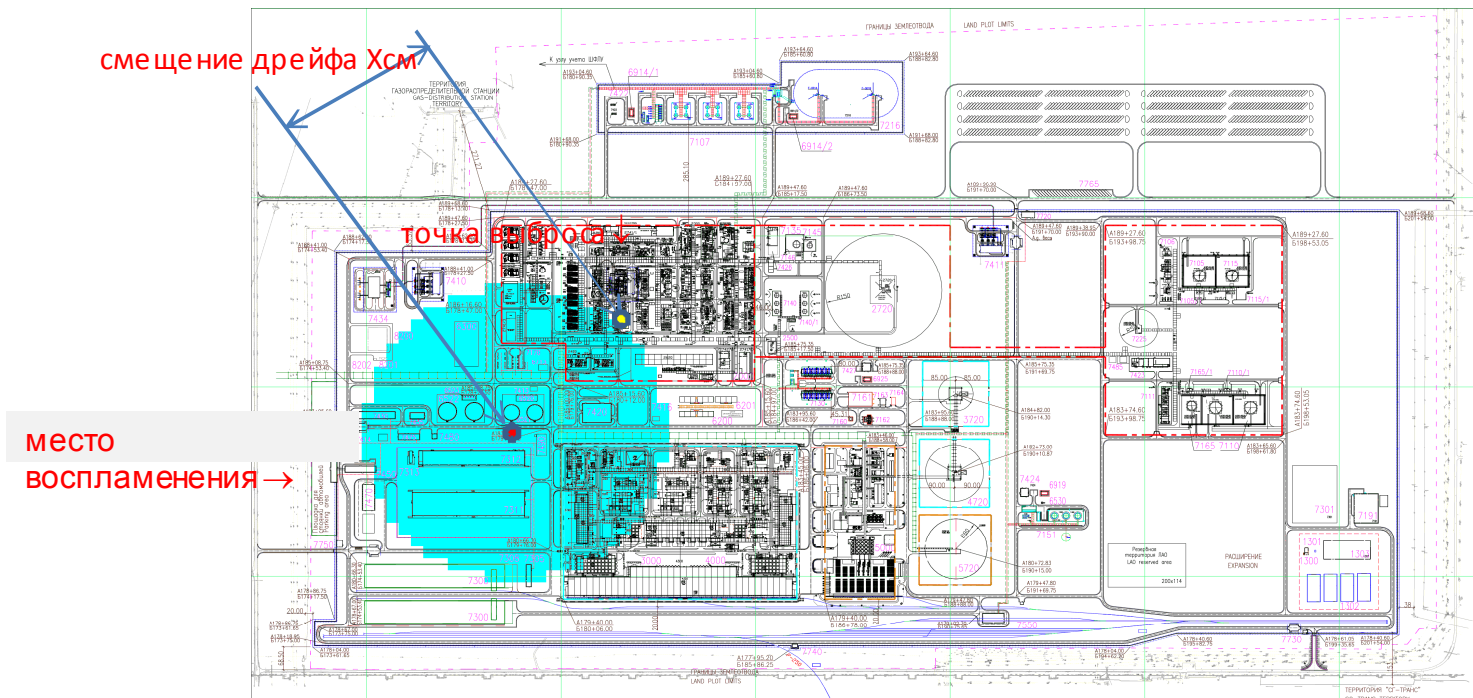
б — расчет по ПБ 09-540—03

без учета дрейфа облака ТВС



Дрейф облака ТВС

ФНП ОПВБ указывает на необходимость учета дрейфа облаков ТВС
Зона действия ударной волны $\Delta P=35$ кПа при аварии с полным разрушением колонны установки пиролиза с дрейфом и взрывом облака ТВС



Расчет по ТОКСИ+risk.

Масса облака ТВС (пропан/ пропилен), участвующая во взрыве – 78 т.
Метеоусловия: ветер северо-восточный 5 м/с, класс устойчивости атмосферы – D.
Смещение центра облака ТВС от источника выброса $X_{см} = 307$ м





Вероятностный подход к обеспечению взрывобезопасности

Расчет условных вероятностей $P(C_{ij} | A)$ реализации расчетных сценариев C_{ij}

$$P(C_{ij} | A) = P(G_s | A) \cdot P(u_{\text{деф}}) \cdot P(S_{\text{св}}) \cdot P(CI | u_{\text{деф}} \cdot S_{\text{св}}) \cdot P_{\text{сгор}} \cdot P(I | A)$$

где $P(G_s | A)$ - частота реализации утечки продукта с интенсивностью G_s

$P(u_{\text{деф}})$ - относительная частота повторяемости в году скорости ветра $u_{\text{деф}}$

$P(S_{\text{св}})$ - относительная частота реализуемости сезона $S_{\text{св}}$ (в разрезе года = 1);

$P(CI | u_{\text{деф}} \cdot S_{\text{св}})$ - относительная частота реализуемости данного класса устойчивости атмосферы

$P_{\text{сгор}}$ - условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при последующем воспламенении

$P(I | A)$ - условная вероятность зажигания облака



Показатели риска взрыва

Риск взрыва: мера опасности взрыва, характеризующая возможность возникновения взрыва и степень разрушения зданий, сооружений при взрыве.

Основные показатели риска :

- ❑ частота возникновения взрыва (аварии с взрывом);
- ❑ потенциальный риск разрушения при взрыве R (частота превышения избыточного давления на фронте падающей ударной волны в рассматриваемой точке территории);
- ❑ частота разрушения (повреждения определенной степени) здания при воздействии ударной волны при взрыве

потенциальный риск разрушения $R_{pзи}^{\Delta P_{\phi}}(x, y)$ определяется зависимостью частоты превышения определенной величины избыточного давления на фронте ударной волны ΔP_{ϕ} , для данной точки территории с координатами (x, y) , на которой могут находиться здания, сооружения и другие материальные объекты



Этапы расчета показателей риска взрыва

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ:

- определение целей и задач, подбор исполнителей;
- обоснование критериев разрушения и взрывоустойчивости



ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПАСНОСТЕЙ:

- сбор и анализ информации (по приложению А);
- определение характеристик и условий содержания ОВ;
- определение сценариев аварий;
- построение деревьев событий;
- предварительные оценки взрывоопасности



ОЦЕНА РИСКА ВЗРЫВА:

- оценка частоты выброса ОВ и взрыва ТВС при различных сценариях аварии;
- оценка последствий аварии:
 - массы ОВ, участвующей во взрыве,
 - параметров ударной волны,
 - зон разрушения;
- оценка показателей риска взрыва



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТИ:
сравнение рассчитанных показателей риска с критериями взрывоустойчивости и приемлемого риска



**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ
ПО УМЕНЬШЕНИЮ РИСКА ВЗРЫВА**



Классификация зон разрушения (Таблица 2 Приложения 3 ФНП)

Класс зоны разрушения	K	*, кПа	Вероятные последствия, характер повреждений зданий и сооружений
1	3,8	*	Полное разрушение зданий с массивными стенами
2	5,6	70	Разрушение стен кирпичных зданий толщиной в 1,5 кирпича; перемещение цилиндрических резервуаров; разрушение трубопроводных эстакад.
3	9,6	28	Разрушение перекрытий промышленных зданий; разрушение промышленных стальных несущих конструкций; деформации трубопроводных эстакад.
4	28	14	Разрушение перегородок и кровли зданий; повреждение стальных конструкций каркасов, ферм.
5	56	*	Граница зоны повреждений зданий; частичное повреждение остекления

Взрывоустойчивость здания характеризуется предельным давлением во фронте взрывной волны, которое могут воспринять конструкции здания без потери ими несущей способности или пригодности к дальнейшей эксплуатации (*Пособие по обследованию и проектированию зданий*)



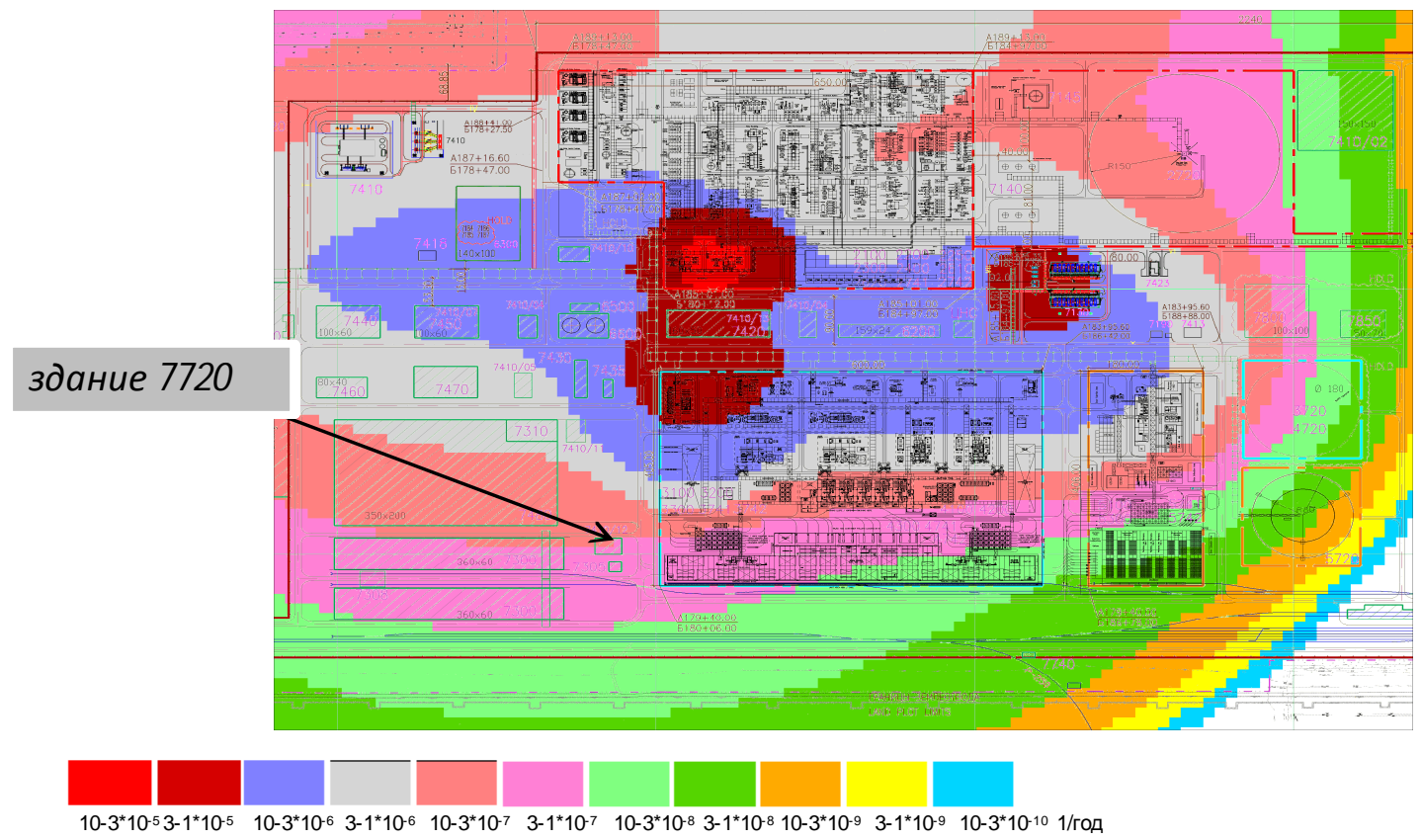
Данные о степени разрушения производственных, административных зданий и сооружений, имеющих разную устойчивость (Таблица 3 Приложения 3 ФНП)

Тип зданий, сооружений	Разрушение при избыточном давлении на фронте ударной волны, кПа			
	Слабое	Среднее	Сильное	Полное
Промышленные здания с легким каркасом и бескаркасной конструкцией	10-25	25-35	35-45	>45
Складские кирпичные здания	10-20	20-30	30-40	>40
Одноэтажные складские помещения с металлическим каркасом и стеновым заполнением из листового металла	5-7	7-10	10-15	>15
Бетонные и железобетонные здания и антисейсмические конструкции	25-35	80-120	150-200	>200
Здания железобетонные монолитные повышенной этажности	25-45	45-105	105-170	170-215
Котельные, регуляторные станции в кирпичных зданиях	10-15	15-25	25-35	35-45
Деревянные дома	6-8	8-12	12-20	>20
Подземные сети, трубопроводы	400 - 600	600 - 1000	1000 - 1500	>1500
Трубопроводы наземные	20	50	130	-
Кабельные подземные линии	До 800	-	-	>1500
Цистерны для перевозки нефтепродуктов	30-50	50-70	70-80	>80
Резервуары и емкости стальные наземные	35-55	55-80	80-90	>90
Подземные резервуары	40-75	75-150	150-200	>200



Критерии разрушения зданий

Распределение потенциального риска разрушения зданий $R_{рзш}(\Delta P_{\phi}, x, y)$, 1/год



$R_{рзш}^{\Delta P_{\phi}}(x, y)$ - частота превышение давления во фронте УВ $\Delta P_{\phi} = 12$ кПа

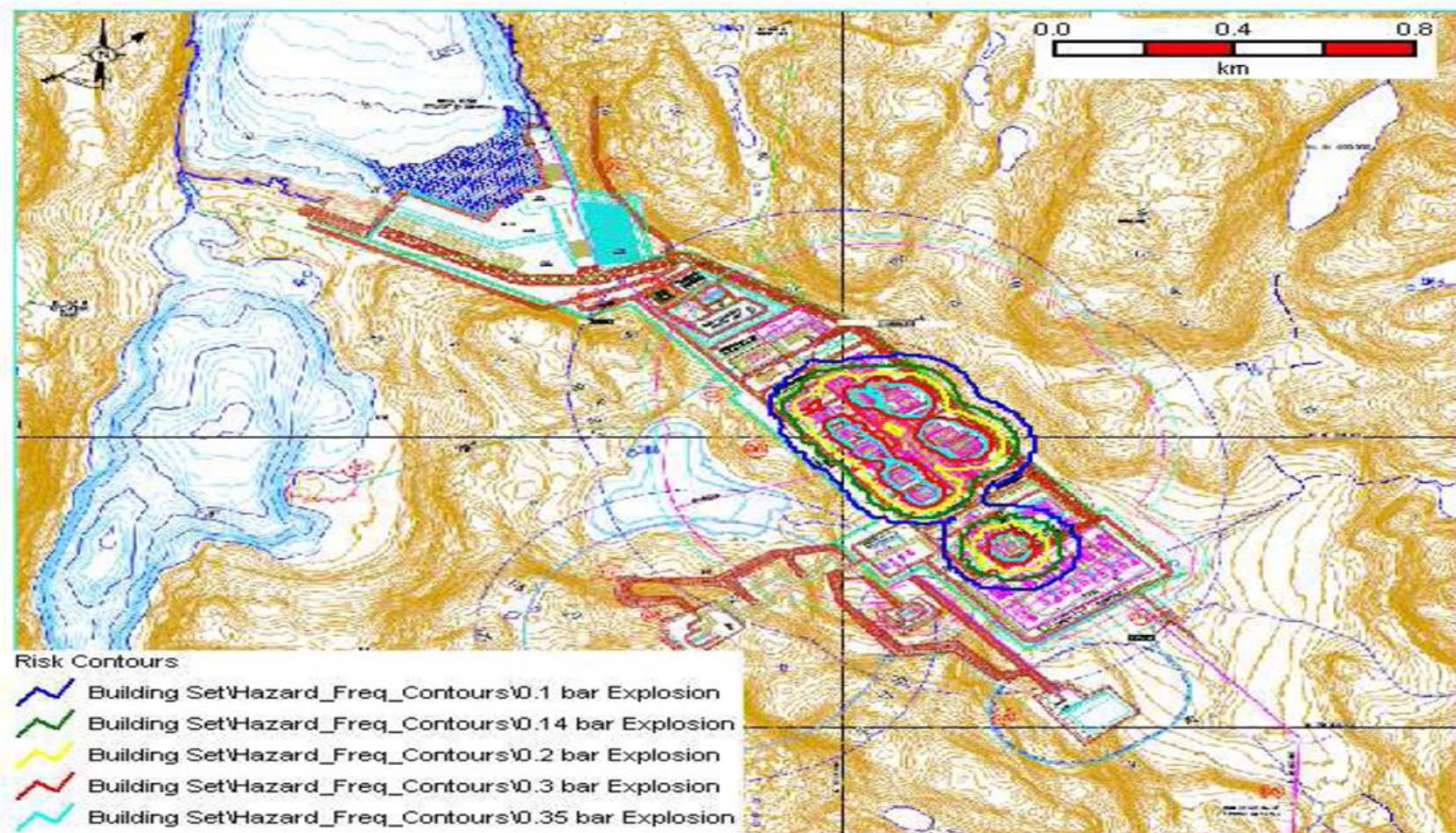


Критерии разрушения зданий

Отчет DNV (2010)

Распределение давления волны сжатия при определенной частоте возникновения:
10-4 год-1 (контурь риска разрушения). DNV Phast

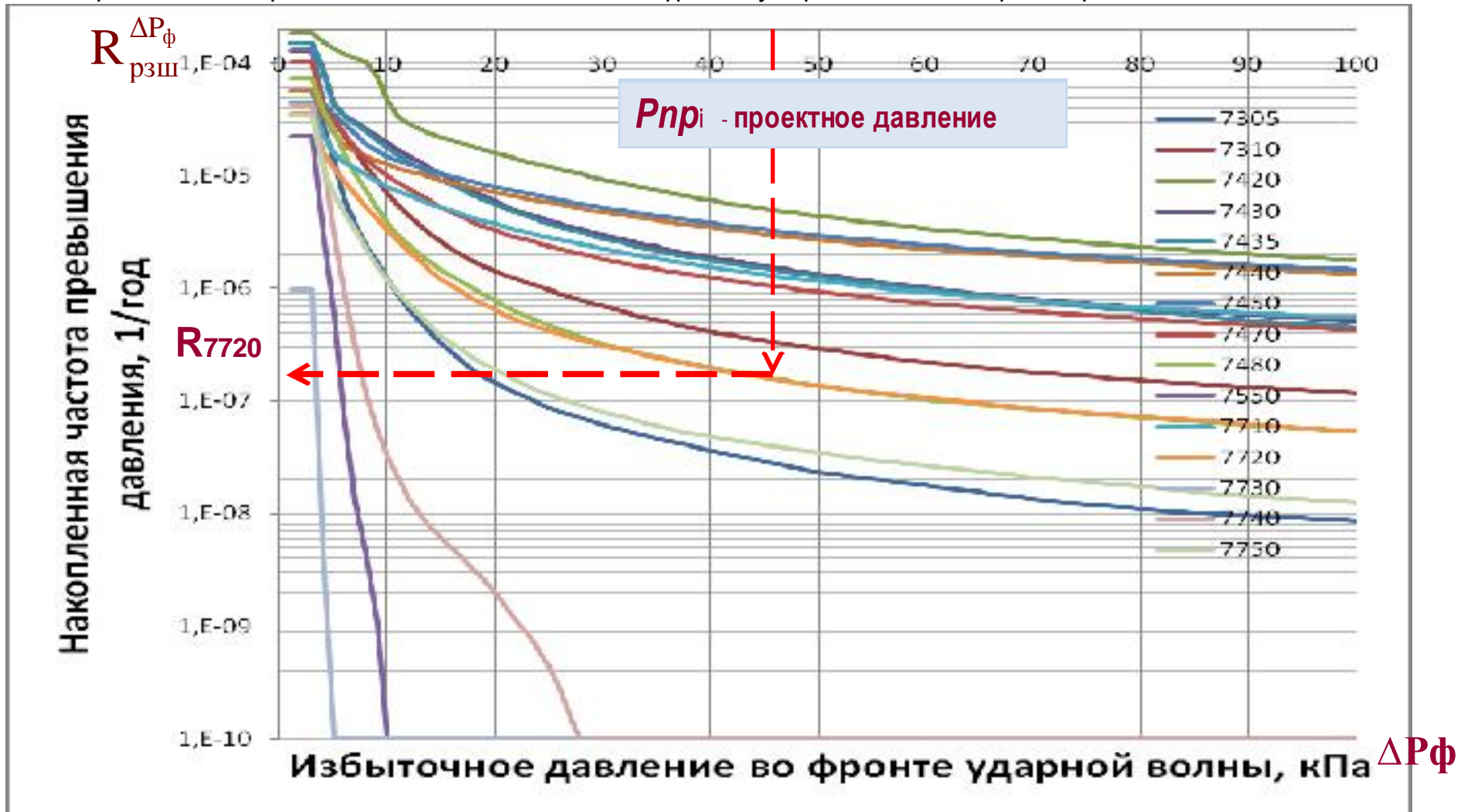
Explosion overpressures at $10^{-4}/yr$





Критерии разрушения зданий

Частота превышения $R_{рзш}$ избыточного давления во фронте ударной волны $\Delta P_{ф}$ для различных зданий





Критерии приемлемого (допустимого) риска разрушения зданий

1) взрывоустойчивость здания обеспечивается, если здание находится вне **максимального возможной зоны действия** ударной волны с амплитудой давления, превышающей проектное давление

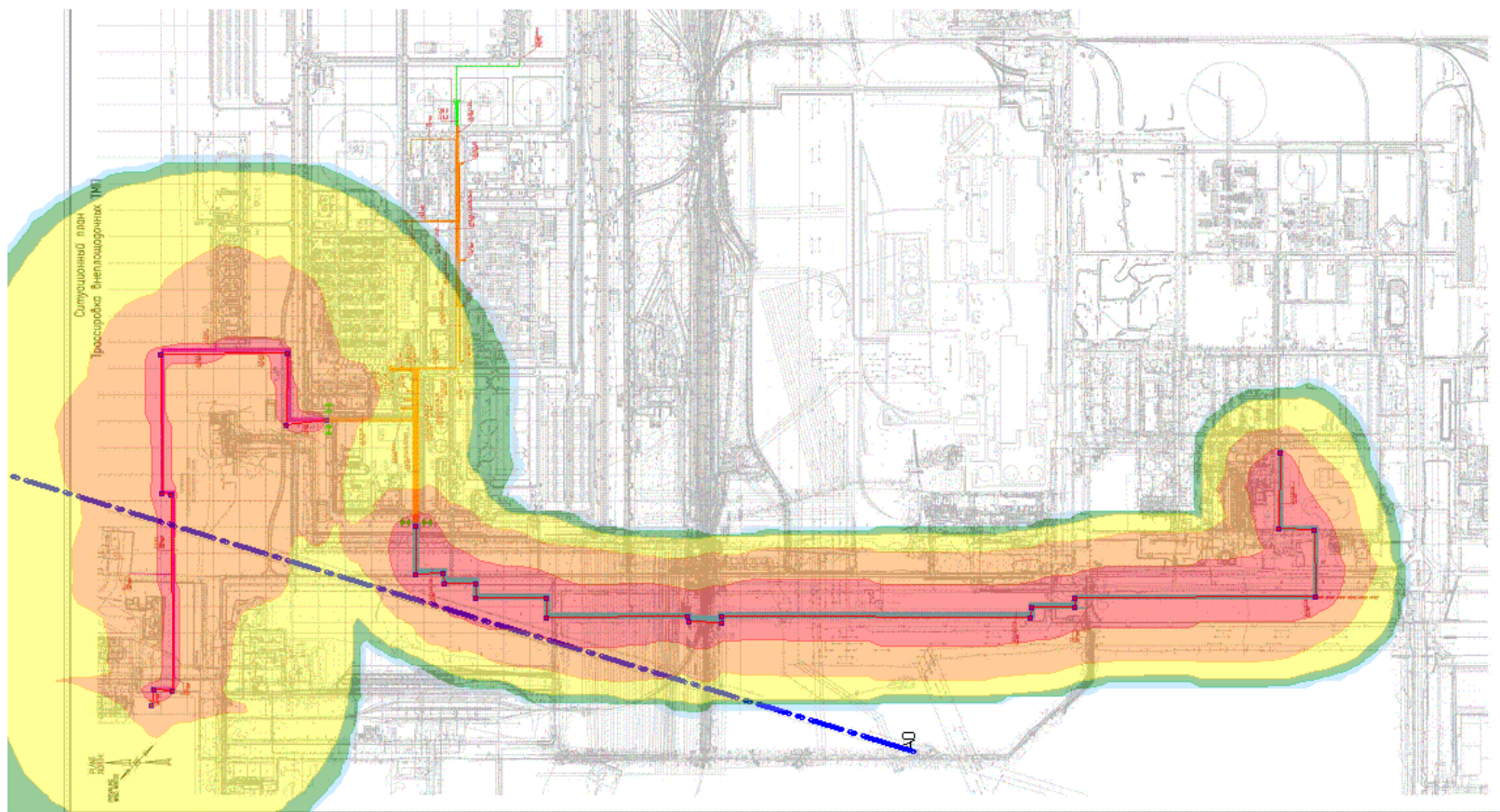
$$\Delta P_{\text{фmax}} < P_{\text{пр}} ;$$

2) в случае невозможности выполнения условия 1, взрывоустойчивость здания обеспечивается, если **частота разрушения здания $R_{\text{рзш}}$ не превышает допустимую величину:**

$$R_{\text{рзш}} < 10^{-4} \text{ год}^{-1}$$



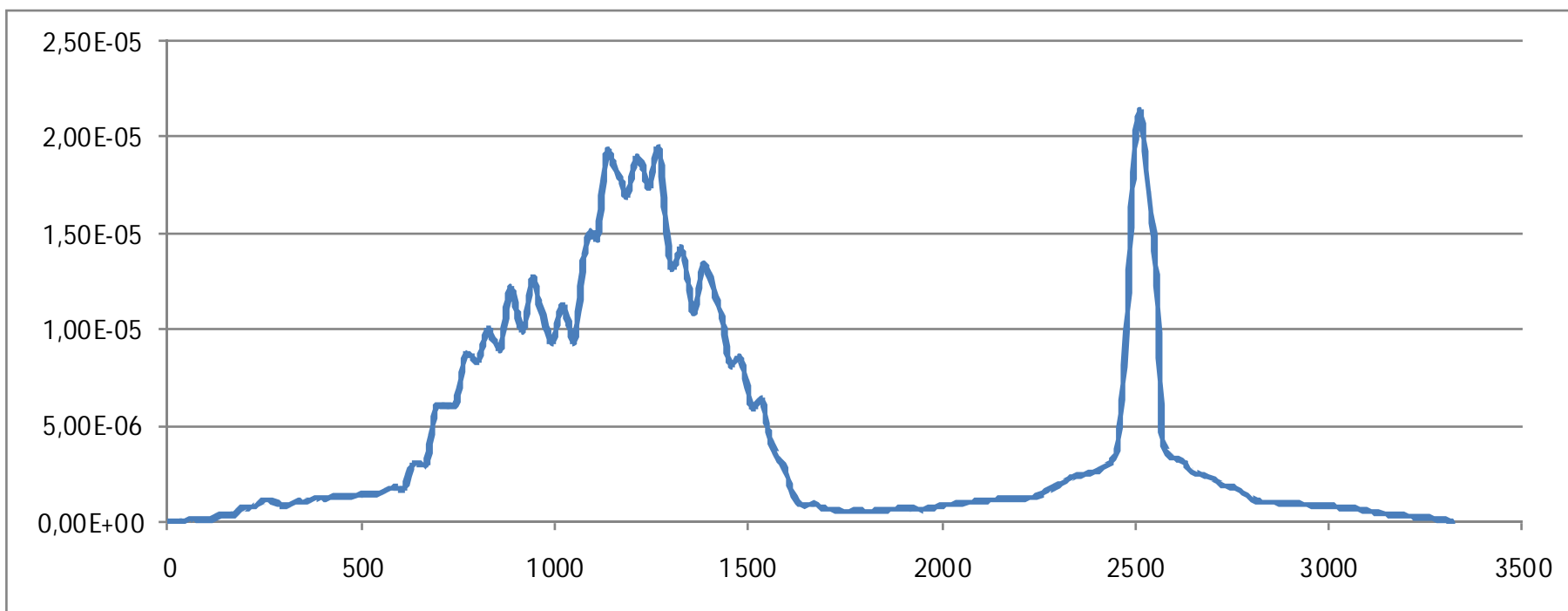
Оценка риска негативного воздействия теплового потока при авариях на трубопроводной эстакаде на ВЭЛ



Поле риска для повреждения ВЭЛ



Оценка риска негативного воздействия теплового потока при авариях на трубопроводной эстакаде на ВЭЛ



Поле риска для повреждения ВЭЛ вдоль трассы



Основные уравнения «прямого численного» (CFD) моделирования выброса и рассеяния

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0;$$

Сохранение массы

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_k \mathbf{u}) = \mathfrak{S}_k - \nabla \cdot \mathbf{I}_k;$$

Сохранение отдельных
компонент

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_l + \mathbf{g};$$

Сохранение импульса

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u}) = \mathfrak{J} - \nabla \cdot \mathbf{I}_q - \nabla \cdot (p \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_l \cdot \mathbf{u}).$$

Сохранение энергии



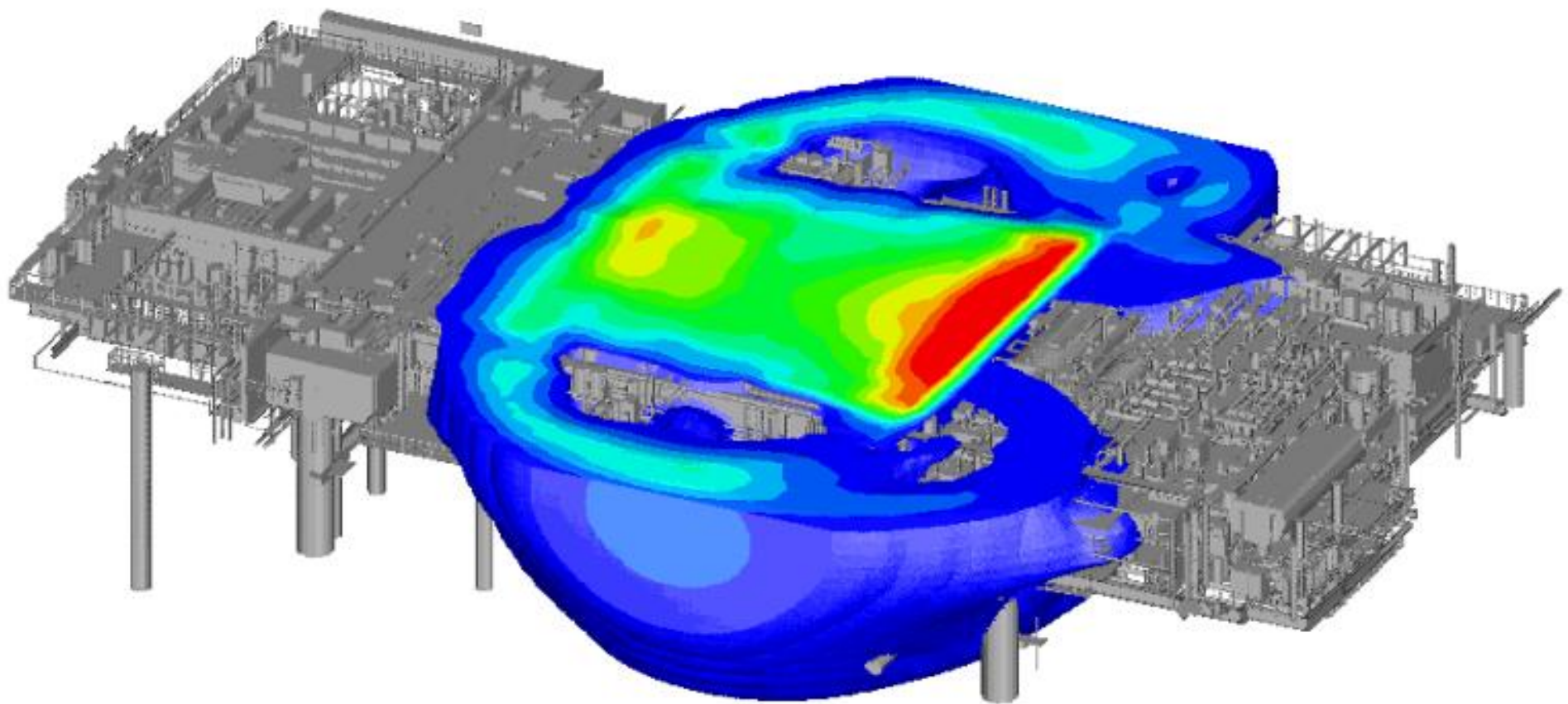
Результаты базового расчета взрывных нагрузок нефтегазодобывающей платформы*



* - По материалам проектной документации проекта Сахалин-1 - рассчитано с учетом требований NORSOK Z-013, использованием FLACS и ExploRAM.



Использование CFD-моделей





Сравнение зарубежной и российской нормативной методической базы

№	Краткое описание модельной задачи. Путь к файлу с подробным описанием	Контролируемый параметр	Значение параметра в FLACS		Значение параметра в ТОКСИ+Risk	Время расчета FLACS	Время расчета ТОКСИ		
			По ветру, м	Против ветра				По ветру, м	Против ветра
1	Рассеяние облака хлора \Tasks\Task1\условие задачи.docx	Зона порогового поражения (токсодоза = 0.6 мг*мин/л)	По ветру, м	67	По ветру, м	67 мин. (Размер ячеек от 0.5м до 1м)	2 мин.		
			Против ветра	6	Против ветра			4	
			Вероятность поражения	61(22)	По ветру			62(58)	
			1(99)%	Против ветра	5(3)			Против ветра	4(4)
	Шероховатость подстилающей поверхности 0.0001м, T=20°C, D-2, m=100кг	Зона порогового поражения (При токсодозе = 0.6 мг*мин/л), м.	t, мин	Зона	t, мин			11.5 ч. (Размер ячеек от 1м до 2м по Хи от 1м до 10м по Y)	5 мин.
			1	170	1				
Рассеяние облака хлора , различные временные интервалы. (до 10 минут) \Tasks\Task4\условие задачи.docx	Зона порогового поражения (При токсодозе = 0.6 мг*мин/л), м.	2	280	2	218				
		3	390	3	309				
		5	620	5	485				
		10	1210	10	847				
2	Условия аналогично п.1								



Сравнение зарубежной и российской нормативной методической базы

3	Взрыв облака водорода (Task2)Task2\условие задачи.docx	Расстояние, на котором достигается заданное превышение избыточного давления:	ΔP , кПа	г. м	ΔP , кПа	г. м	5 мин. (Размер ячеек 1м)	-1 мив.
	5		30.6	5	217.7			
	10		27	10	113			
	15		23	15	83			
	20		20.5	20	68			
	25		17	25	59			
Полушфера ($r=100$), $P=100$ кПа, $T=10^\circ\text{C}$, $m=51$ кг, шпиль, слабая заторможенность								
4	Рассеяние облака пропана (Task3)Task3\условие задачи.docx	Радиус зоны НКНВ, м.	21		18.5		14 мин. (Размер ячеек 1м)	-1 мив.
	Масса 50кг, НКНВ 2%, плавящие условия.	Высота зоны НКНВ, м.	0.7		0.62			
5	Рассеяние пропана , различные временные интервалы. (до 5 минут) (Task5)Task5\условие задачи.docx	Зона НКНВ, м.	t, с	Зона	t, с	Зона	281 мин. (Размер ячеек 2.5м)	-1 мив.
			20	70	20	58		
			50	117	50	106		
			100	170	100	143		
			130	220	130	170		
	перехватость 1.3м, объем газа 3170 м ³ , B-1.	Время всасывания зоны НКНВ, с.	280		135			



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ