



Сравнение расчетов последствий аварий на магистральном трубопроводе СУГ с помощью компьютерных комплексов FLACS и ТОКСИ+

Агапова Екатерина Александровна,
мл. научный сотрудник,
тел.: (495)620-47-50,
e-mail: eagarova@safety.ru

Москва, 06.10.2014 г.

ОБЪЕКТ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – методические документы и компьютерные программы по оценке риска аварий и взрыва на опасных производственных объектах.

Цель работы – сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ для расчета зон разрушения и оценки риска аварий, применяемых при обосновании взрывоустойчивости зданий и сооружений взрывопожароопасных производственных объектов.

Результаты работы направлены на *совершенствование методов анализа риска аварий*, в том числе путем обоснованного использования зарубежных компьютерных программ для практических работ по анализу риска.

Расчет последствий выброса и рассеяния опасных веществ при аварии в программном комплексе ТОКСИ+RISK

Программный комплекс ТОКСИ+ (и его версия ТОКСИ+Risk для оценки риска), разработанный специалистами ЗАО НТЦ ПБ, успешно используют более 250 крупных российских и зарубежных организаций нефте-газового профиля и организаций, специализирующихся в области анализа риска.

В ТОКСИ+ запрограммированы действующие российские методики Ростехнадзора и МЧС России для расчета последствий аварий и оценки показателей риска (в т.ч. и пожарного с возможностью расчета времени эвакуации и т.д.).

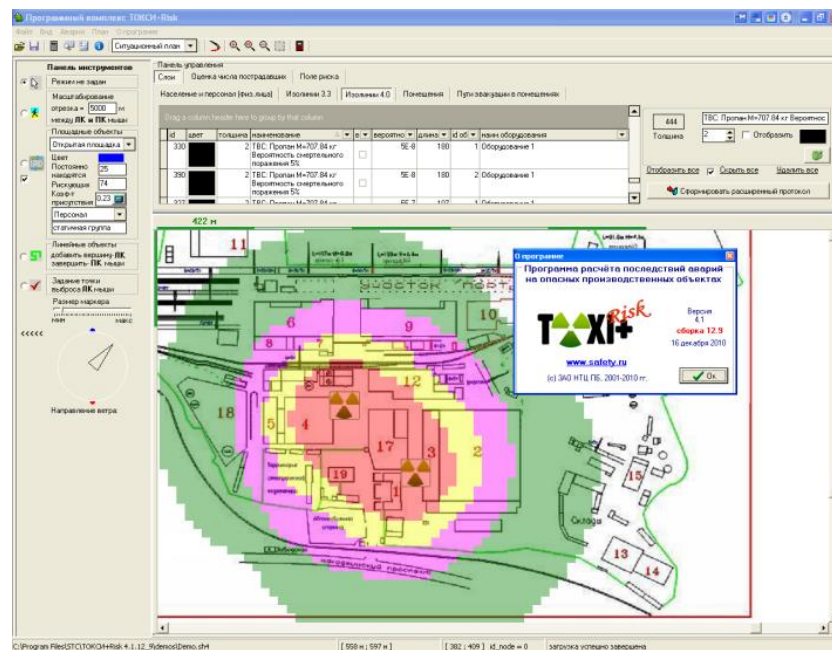
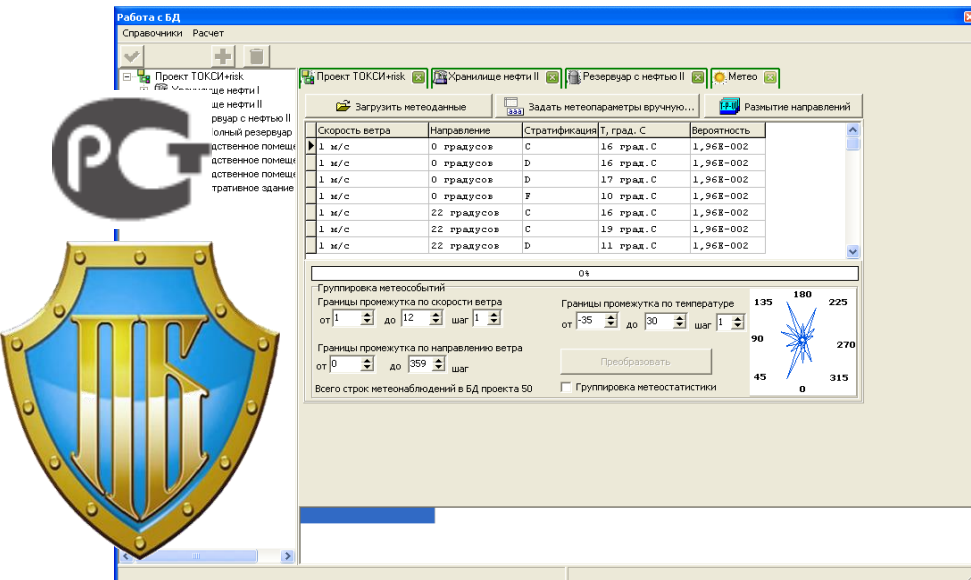


Рисунок - ТОКСИ+Risk: инструмент работы с массивами метеостатистики (слева) и управляющая оболочка в режиме построения поля риска (справа)

Расчет последствий выброса и рассеяния опасных веществ при аварии в программном комплексе PHAST 7.0

Программный комплекс PHAST и его версия для оценки риска SAFETI (PHAST RISK), разработанный международной фирмой Det Norske Veritas (DNV), широко используются в мире в течение более чем 20 лет для количественной оценки риска в нефтегазовой и химической промышленности.

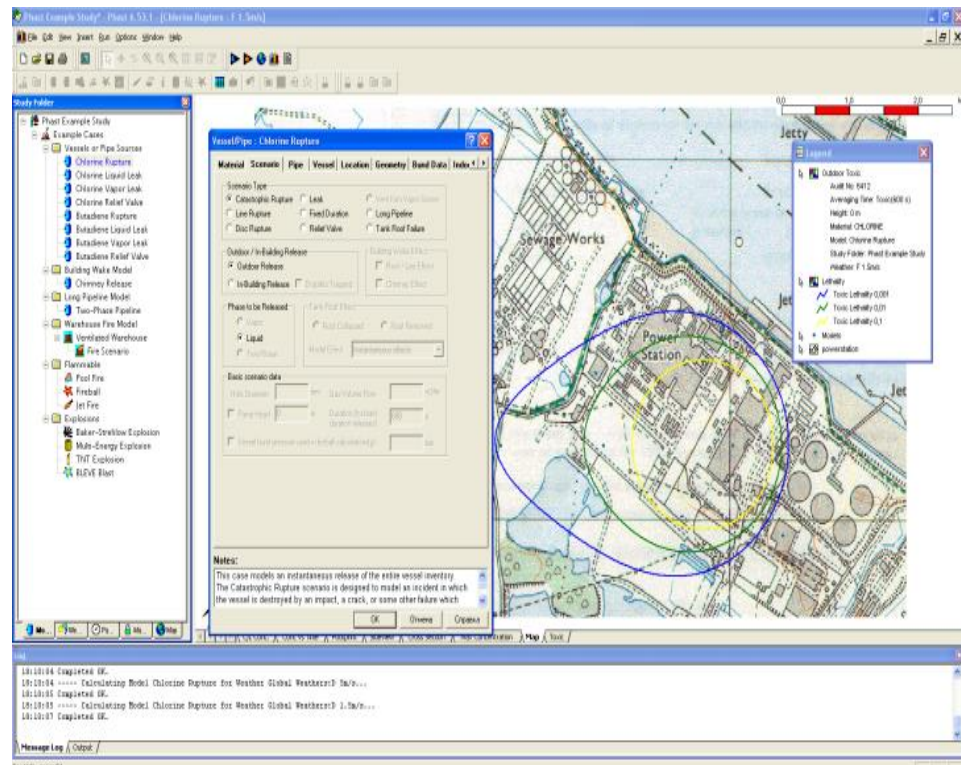
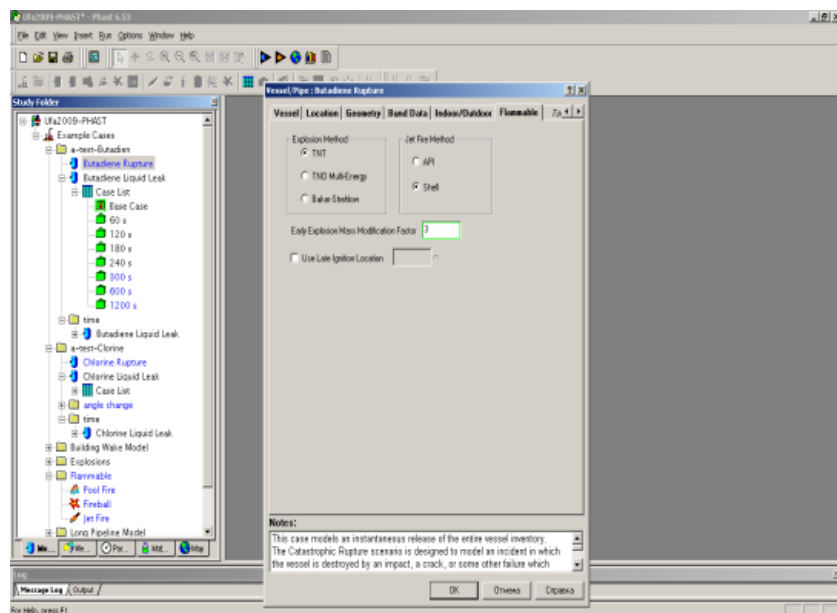


Рисунок – DNV PHAST. Окно ввода параметров расчета (слева) и нанесение зон поражения на план опасного производственного объекта (справа)

Расчет последствий выброса и рассеяния опасных веществ при аварии в программном комплексе FLACS

Моделирование осуществляется на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD).

Для моделирования распространения опасных веществ во FLACS проводится численное интегрирование системы уравнений в частных производных, представимых в виде уравнений:

- **Уравнение сохранения массы:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_i \rho u_i) = \frac{\dot{m}}{V}$$

- **Уравнение сохранения импульса:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\beta_i \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\beta_j \sigma_{ij}) + F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i$$

- **Уравнение переноса для энтальпии:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_v \rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \beta_v \frac{Dp}{Dt} + \frac{\dot{Q}}{V}$$

- **Уравнение переноса для массовой доли топлива:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho Y_{fuel}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j Y_{fuel}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{fuel}} \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j} \right) + R_{fuel}$$

- **Уравнение переноса для доли смешения:**

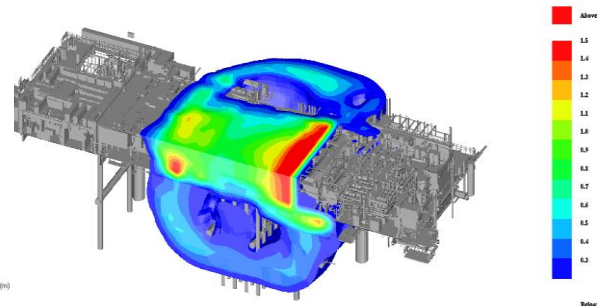
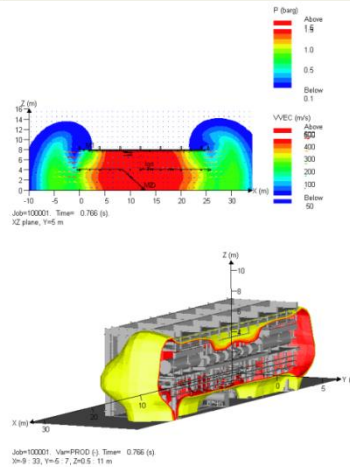
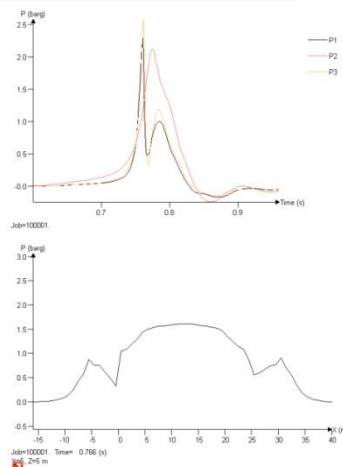
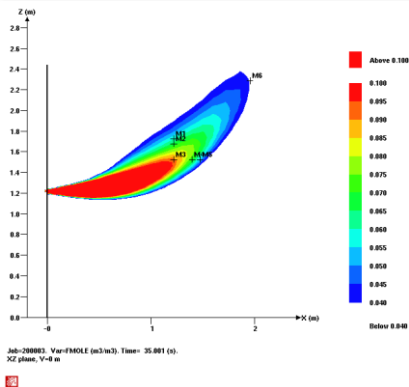
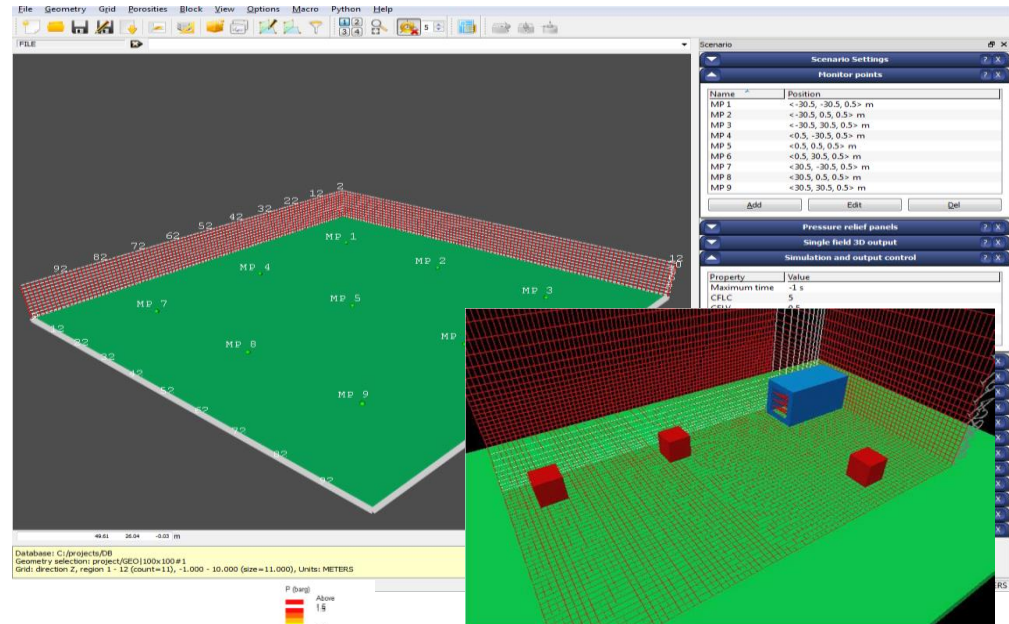
$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho \xi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \xi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right)$$

Зарубежный опыт оценки взрывных нагрузок:

Использование программного комплекса FLACS (Flame Acceleration Simulator)

1. Моделирование геометрии утечки;
2. Анализ частоты утечки;
3. Моделирование рассеяния газа;
4. Моделирование зажигания газозавоздушной смеси;
5. Симуляция взрыва;
6. Вероятностный анализ взрыва.

* - на примере выброса газа



ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ ПОСЛЕДСТВИЙ ТИПОВЫХ СЦЕНАРИЕВ АВАРИЙ

Задача 1.

Продолжительное истечение СУГ

•сценарий моделирования – продолжительное истечение через отверстие 20 мм 5т сжиженного пропана, ситуация моделирующая выброс ШФЛУ на продуктопроводах

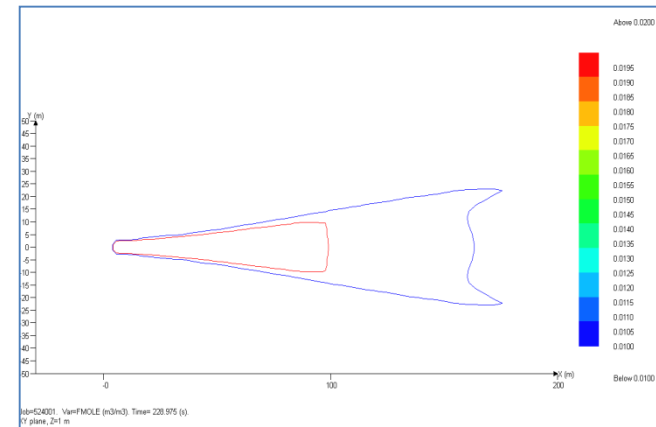
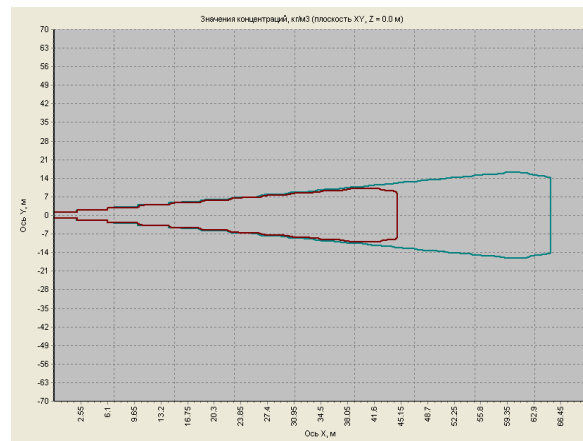
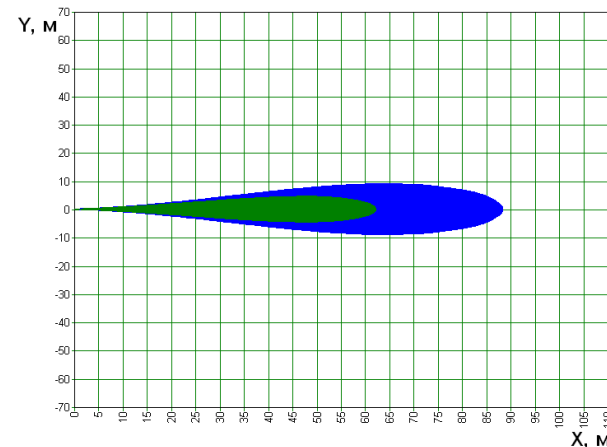


Рисунок- Расчетные зоны концентраций (НКПР и НКПР/2) по PHAST (а), ТОКСИ + (б) , FLACS (в) для класса устойчивости атмосферы 5D

	PHAST DNV		ТОКСИ+		FLACS		Методика МЧС
	2F	5D	2F	5D	2F	5D	
НКПР, м	81	62	97	47	118	95	84,5
0,5 НКПР, м	104	88	149	67	350	177	-

Таблица - Размер зоны НКПР и 0,5 НКПР

Задача 2.

Моделирование дефлаграционного сгорания облака водорода

•сценарий моделирования – сгорание полусферического облака стехиометрического состава (такие облака могут образовываться при полное мгновенном разрушении ёмкости) .
 Масса водорода – 52,3 кг

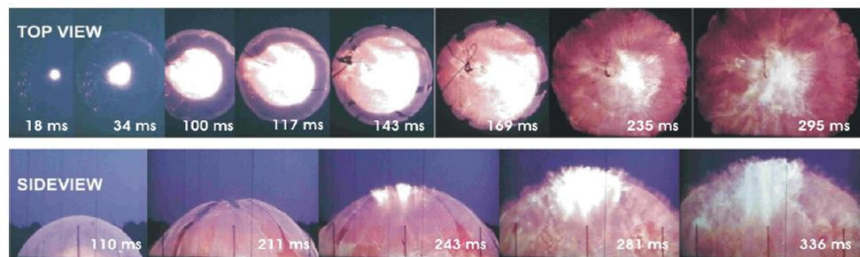


Figure 1. Snapshots of test GHT 34 in a 20 m diameter hemisphere.

Рисунок – Картина горения облака водорода (эксперимент в начале 80-х годов)

ΔP , кПа	Эксперимент $r_{эксп}$, м	ПК FLACS r_{FLACS} , м	ПК ТОКСИ (РД 03-409-01) $r_{РД 03-409-01}$, м $u_{max}/u_{ср}$	ПК PHAST TNT/BST
6	5 8	5	25,63/-	95/125
5	18	7	34,68/-	108/148
4	35	12	47/-	128/184
2	80	25	105/51,5	218/350

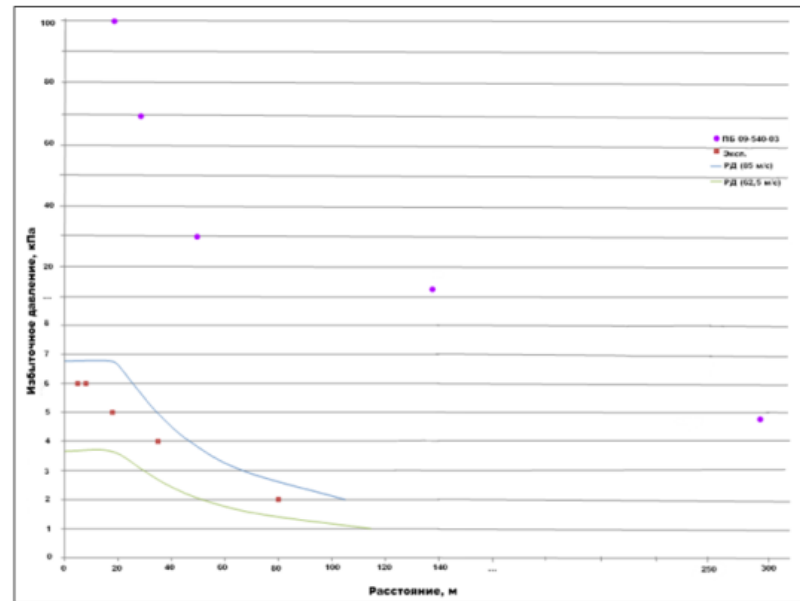
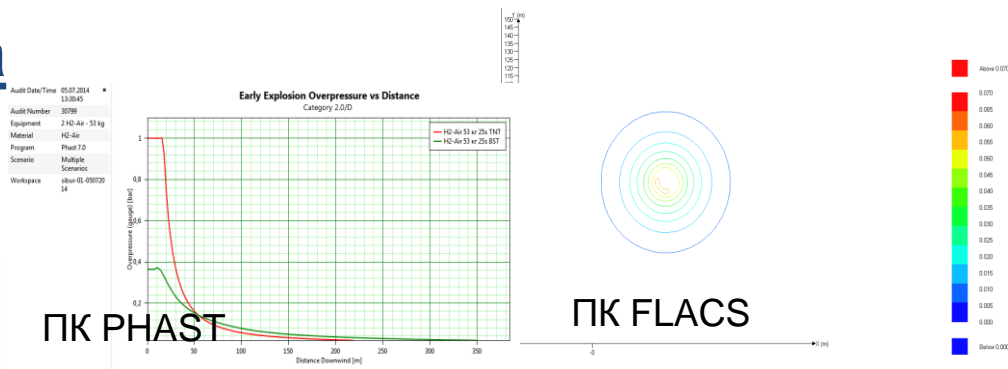


Рисунок - Изменение избыточного давления во фронте ударной волны от взрыва водородовоздушной смеси

Расчеты по методике «тротилового эквивалента» (ПБ 09-540-03) показывают превышение давления в по сравнению с экспериментом и расчетом по РД 03-409-01 более чем в 10 раз (верхние точки)

Задача 3.

Моделирование рассеивания облака пропана.

Определение зон НКПР

•сценарий моделирования – полное мгновенное разрушение ёмкости, содержащей 50 кг пропана

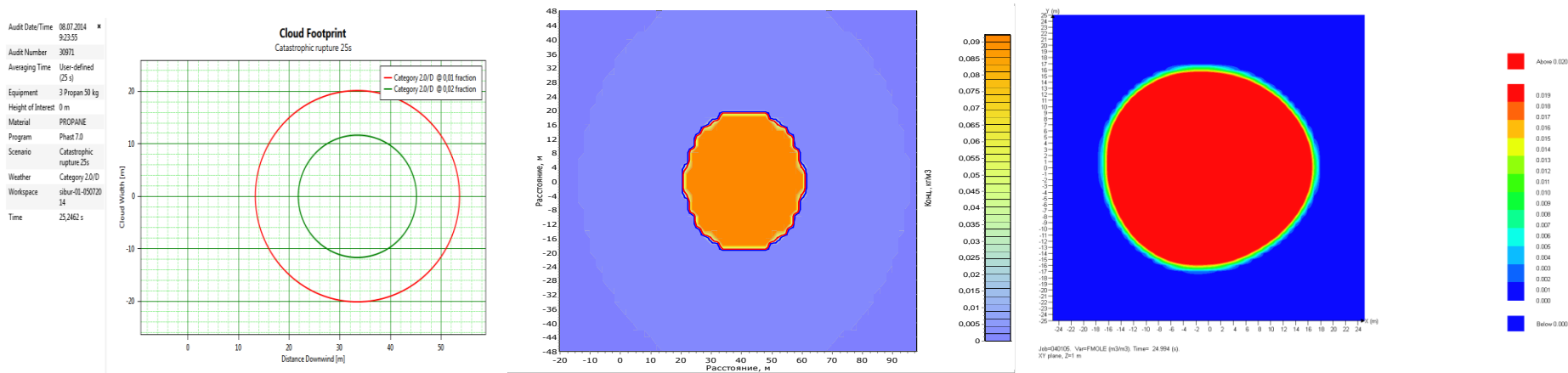


Рисунок - Изолинии концентрации (ПК PHAST, ТОКСИ+Risk, FLACS)

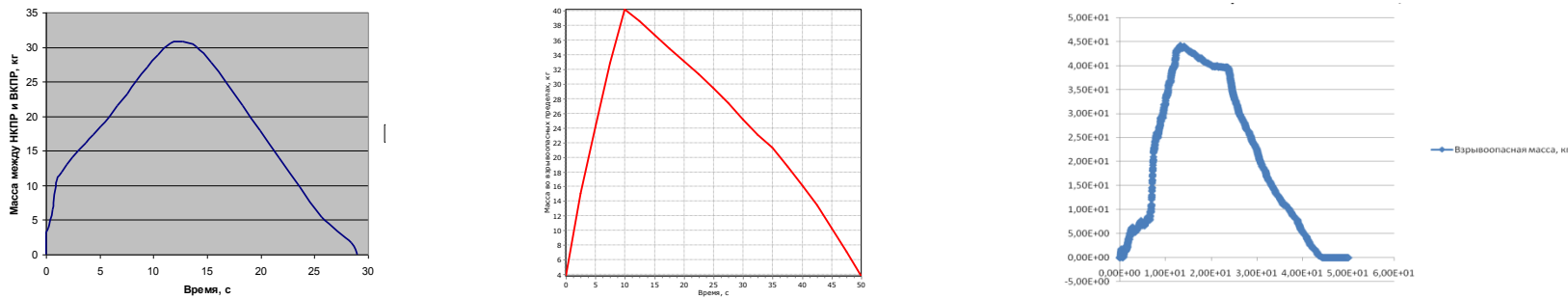


Рисунок - Графики зависимости взрывоопасной массы (кг) от времени

	PHAST	ТОКСИ+Risk	FLACS	Методика МЧС
Радиус зоны НКПР, м	12	18,48	16	18,5
Высота зоны НКПР, м	0,7	0,62	0,8	
Время исчезновения зоны НКПР, с	29	51	48	
Максимальная взрывоопасная масса пропана, кг	31	40	44	

Задача 4.

Моделирование

рассеяния облака

пропилена

•сценарий моделирования – полное
мгновенное разрушение ёмкости,
содержащей 3170 м3 пропилена

Рисунок (3 справа) - Размер зоны НКПР на различные моменты времени

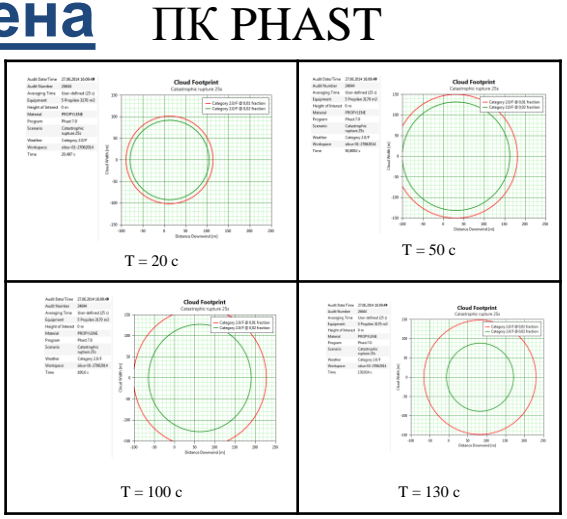
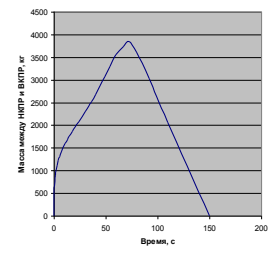
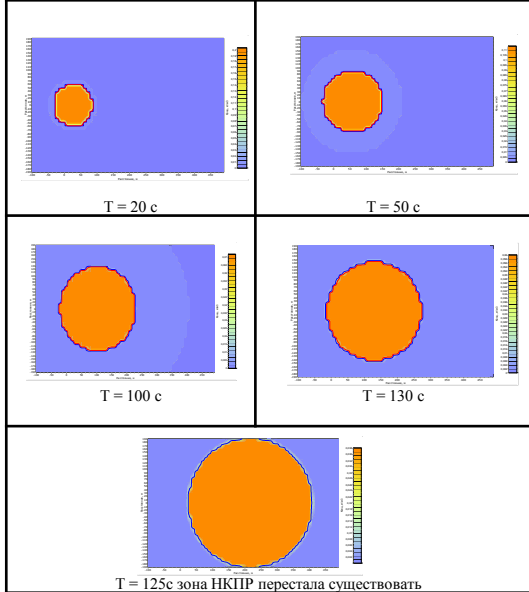


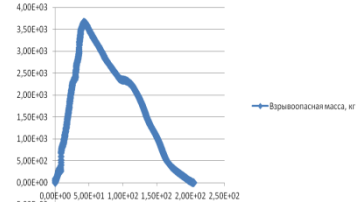
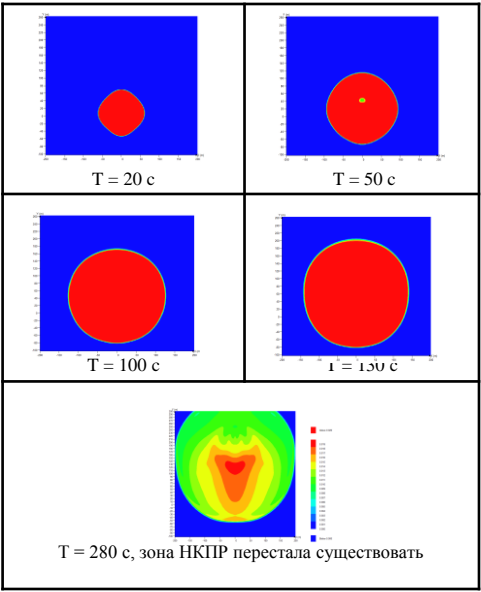
Рисунок (3 справа) - Значения максимальной взрывоопасной массы



ПК ТОКСИ



ПК FLACS



t, c	Зона НКПР, м. PHAST	Зона НКПР, м. «ТОКСИ»	Зона НКПР, м. FLACS	Зона НКПР, м Методика МЧС
20	104	87	70	88,3
50	163	145	117	
100	190	224	170	
130	171	275	220	
Время исчезновения зоны НКПР	150	235	280	
Максимальная взрывоопасная масса пропилена, кг	3800	4500	3700	

Задача 5.

Моделирование взрыва облака ТВС в загроможденном помещении с легкобрасываемыми конструкциями (ЛСК)

•сценарий моделирования – взрыв облака ТВС в помещении с ЛСК

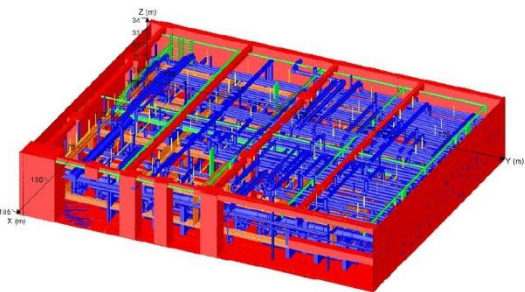


Рисунок (слева) - Схема модуля (направление на север соответствует оси ОУ)

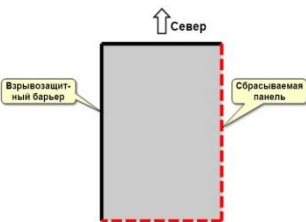


Рисунок (слева) - Конфигурация стен модуля (вид сверху)

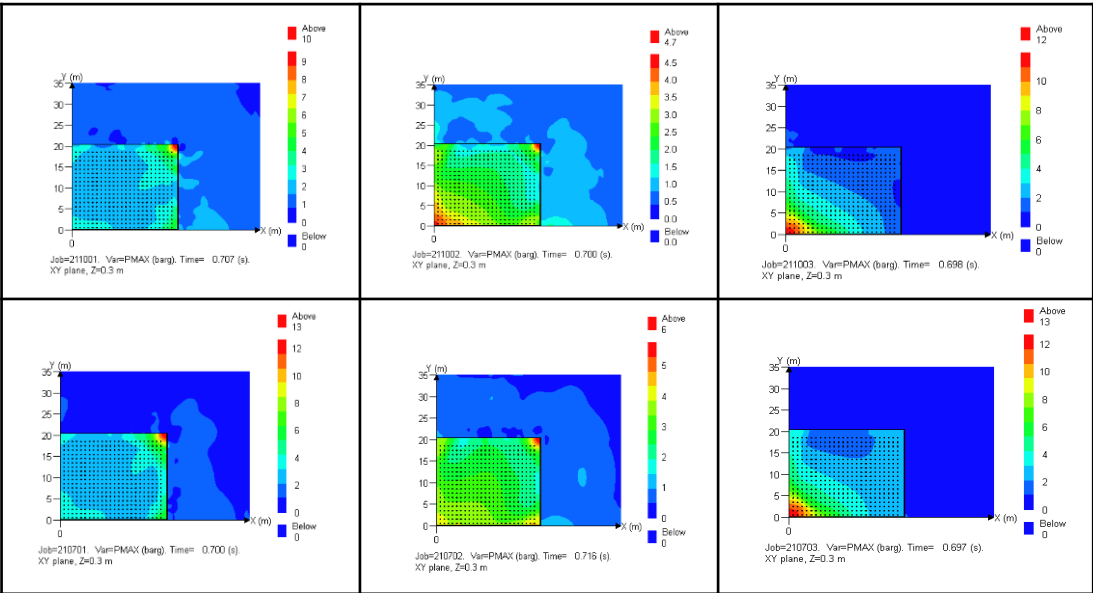


Рисунок (сверху) - Распределение давления при взрыве облака ТВС при различных сценариях моделирования (ПК FLACS)

FLACS				СТО РД «Газпром» 39-1.10-084-2003	
Место воспламенения	Значение изб.давления Pmax, бар.			0,899	
	Угол раскрытия ЛСК (или площадь панели)				
	100%		70%		
	1	10	13		
2	4,7	6			
3	12	13			

=> Влияние загроможденности и расположения источника зажигания

Таблица- Значение изб.давления Pmax при различных сценариях моделирования (ПК

Моделирование выброса нестабильного газового конденсата (НГК) на магистральном трубопроводе СУГ

Исходные данные:

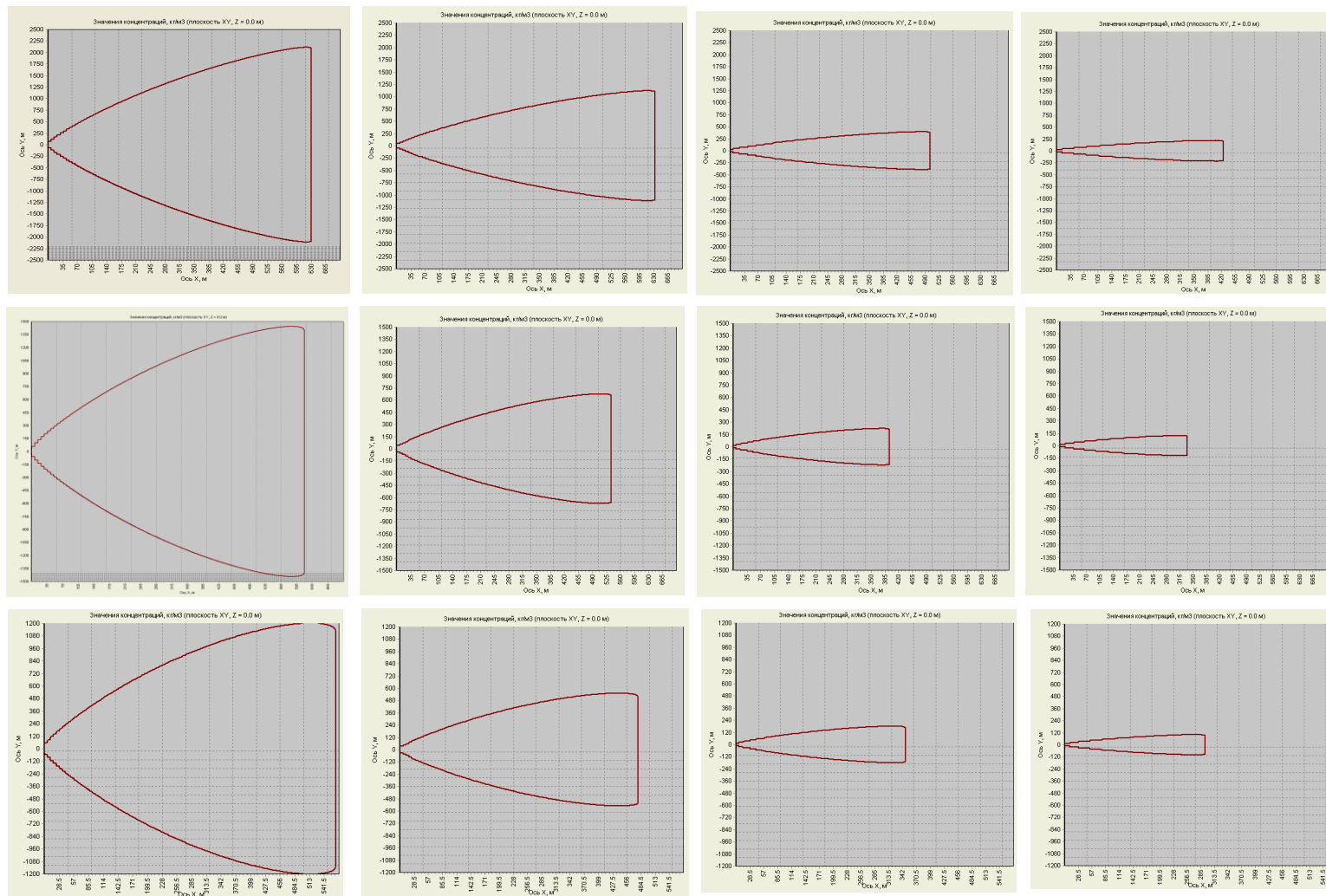
- Продуктопровод предназначен для транспортировки нестабильного газового конденсата (НГК) сжиженном состоянии. (Трасса трубопровода проходит по территории Иркутской области);
- Режим работы трубопровода – непрерывный, 8400 ч/год (350 сут);
- Рабочее (нормативное) давление в трубопроводной системе транспорта – до 10 МПа;
- Компонентный состав транспортируемого продукта – см. в табл.
- Температура продукта: для НГК на входе в НС – плюс 8,5°С;
- Высотная отметка трубопровода – 574 м, высотная отметка населенного пункта – 357 м, перепад высот – 217 м.

Компоненты:	НГК
Метан (CH ₄)	0,2
Этан (C ₂ H ₆)	29,7
Пропан (C ₃ H ₈)	25,6
и-бутан (iC ₄ H ₁₀)	5,8
н-бутан (nC ₄ H ₁₀)	10,1
и-пентан (iC ₅ H ₁₂)	3
н-пентан (nC ₅ H ₁₂)	3,3
н-гексан (nC ₆ H ₁₄)	4,6
н-гептан (nC ₇ H ₁₆)	4,2
н-октан (nC ₈ H ₁₈)	3,5
н-нонан (nC ₉ H ₂₀)	3,1
н-декан (nC ₁₀ H ₂₂)	6,8
CO ₂	0,1

Таблица. Компонентный состав транспортируемого продукта (% ,масс.)

Моделирование выброса нестабильного газового конденсата (НГК) на магистральном трубопроводе СУГ в ПК ТОКСИ+Risk

Расчет дрейфа осуществлялся по РД-03-26-2007 по программе ТОКСИ для температуры окружающей среды 15°C. Диаметр отверстия 300 мм.



При крупных
утечках
зоны
поражения
могут
достигать
200 м при
штилевых
условиях и
до 630 м
при плохих
условиях
рассеяния



Рисунок - Вид облаков ТВС для расхода пара 388 кг/с в зависимости от метеорологических условий

Моделирование выброса нестабильного газового конденсата (НГК) на магистральном трубопроводе СУГ (сжиж. углеводор.газы) в ПК FLACS

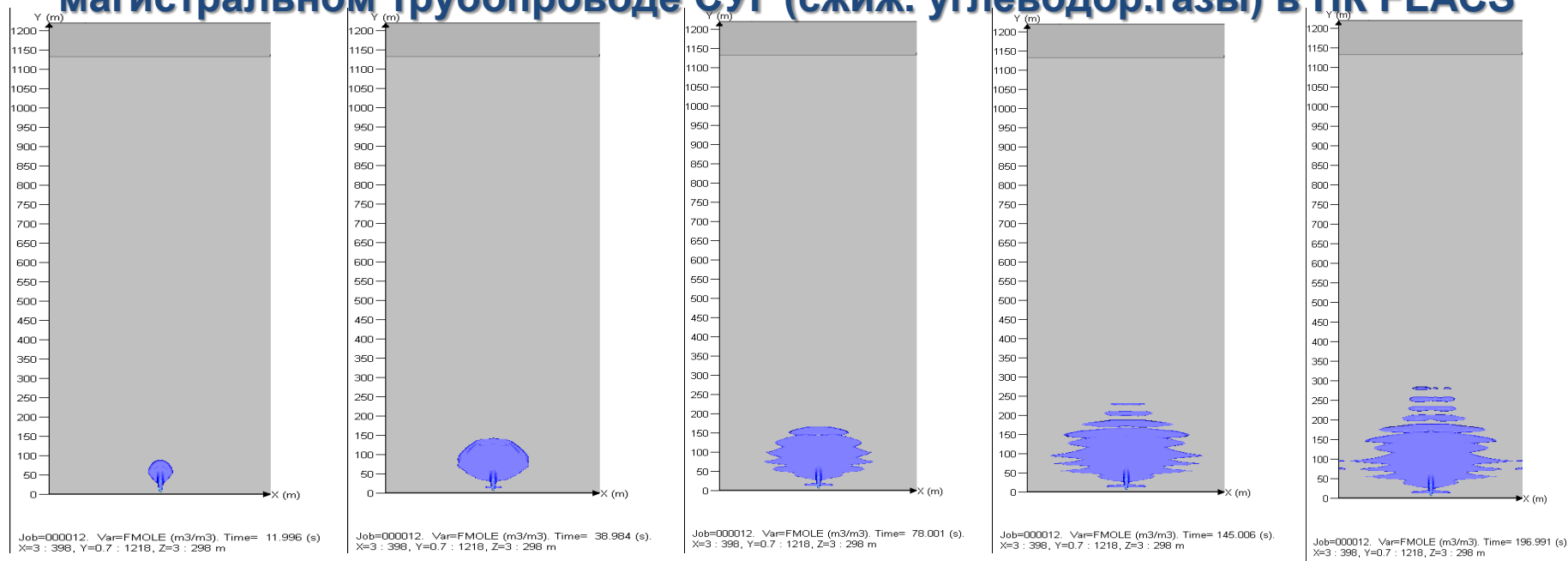
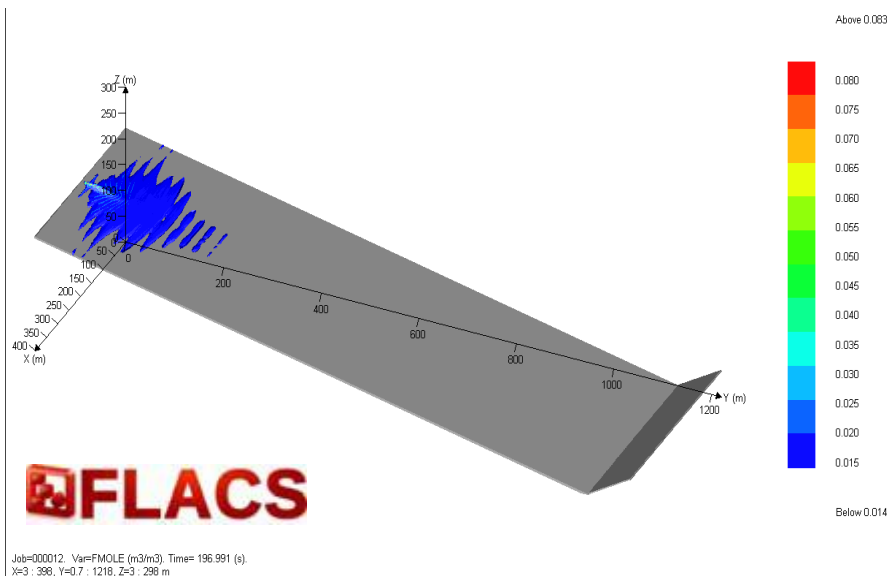


Рисунок - Распределение взрывоопасной концентрации НГК

(диаметр аварийного отверстия 300 мм, температура воздуха 20 °С, газо-капельно-воздушная смесь)



Далее моделируется вариант, при котором **часть выброса (71,6 %) остается в жидком состоянии и образует лужу на поверхности земли с последующим испарением.**

=> моделирование выброса при различных условиях показало, что даже в условиях неравномерного рельефа (перепад высот более 200 м), максимальные дрейф облака ТВС с учетом растекания жидкой фракции не превысит 300 м от оси продуктопровода.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДИК И КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ. ВЫВОДЫ

Наиболее точная модель, описывающая распространение и взрывы облаков опасных - программный комплекс FLACS.

- + учет особенностей геометрии окружающего пространства;
- + учет расположения источников зажигания (позволяет моделировать взрывы многокомпонентных смесей углеводородных газов);
- + возможность задания многокомпонентного состава выброса;
- необходимость больших временных ресурсов для подготовки исходных данных, подложки и для проведения расчета;
- необходимость высокой квалификации специалистов, проводящих расчет;
- высокая стоимость ПК;

- В большинстве случаев **программный комплекс FLACS** дает **наименее консервативные результаты** для оценки зон поражения от барического воздействия

- **Методика тротилового эквивалента**

- ✓ наиболее консервативная из всех рассматриваемых методик ;
- ✓ не учитывает физические процессы протекающие при взрывах облаков, в т.ч. дрейф облаков ТВС в условиях ветра.

- **Методика МЧС**

- ✓ аналогично не позволяет учесть дрейф методика МЧС, что ограничивает область ее применения выбросами веществ в условиях безветрия.

Спасибо за внимание!