



**ОЦЕНКА ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОСТИ  
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОПАСНЫХ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ  
(изучение зарубежного опыта оценки  
взрывоустойчивости морских  
нефтегазовых объектов)**

**Самусева Евгения Алексеевна**

**научный сотрудник**

**ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем  
промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ)  
группы компаний «Промышленная безопасность»**

[www.safety.ru](http://www.safety.ru)

2010 г.

# Примеры крупных промышленных аварий



Россия, Уфа, 4.06.1989.  
Авария на трубопроводе  
ШФЛУ. Погибло или тяжело  
пострадало 1224 пассажиров  
2-х поездов. Площадь,  
покрытая облаком – 2.5 км<sup>2</sup>.



Россия, ООО «Оренбурггазпром»,  
21.08.2004. Авария с эффектом  
«домино» на гелиевом заводе  
(СУГ). 1 чел. погиб (пожарный),  
8 травмировано



Англия, Лондон, 11.12.2005.  
Самый большой со времён  
второй мировой войны  
промышленный пожар на  
нефтехранилище Bansfield. В  
общей сложности огнем были  
охвачены 20 резервуаров с  
топливом. Пострадало 43  
человека.





## Примеры крупных аварий на морских нефтегазодобывающих объектах



06.07.1988. Взрыв вследствие утечки газа из насосного оборудования на платформе «Piper Alfa», который привел к смерти 167 человек.



28.04.1989. Пожар в результате выброса газа на платформе «Santa Fe Al Baz», в результате которого погибли 5 человек.



14.04.2000. Разрушение буровой установки «NDC Al Mariyah», в результате которого 5 человек погибло и 8 получили ранения.



27.07.2005. Пожар вследствие столкновения платформы с судном в Индийском океане, повлекший за собой гибель 49 человек.

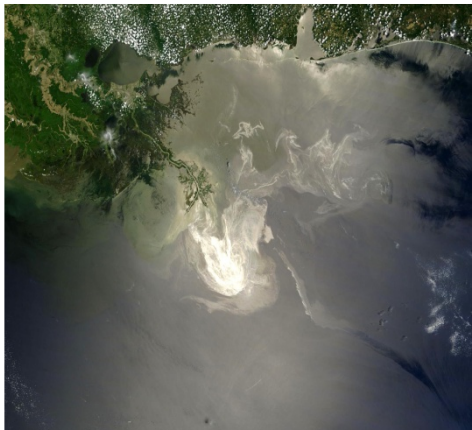


## Перечень аварий и инцидентов на морских буровых судах и платформах, произошедших в 2007-2010 годах

Дата и место	Вид аварии	Описание аварии / инцидента, основные причины и последствия
23.10.2007 Мексиканский залив	Штормовое столкновение, пожар	Штормовые ветры вызвали колебания платформы, что привело к удару о вершину клапана фонтанной арматуры соседней платформы. Произошла утечка нефти и газа, с последующим воспламенением. Погиб 21 человек.
24.05.2008 Северное море	Утечка нефти	На нефтедобывающей платформе «Статфьорд А» произошла утечка нефти. Были эвакуированы 156 человек. Часть нефти попала в море.
15.06.2008 Северное море	Пожар на платформе	На норвежской нефтедобывающей платформе «Озеберг А» произошел пожар. Сразу же после возгорания четыре вертолета эвакуировали с платформы 311 нефтяников. Пожар удалось локализовать.
03.09.2008 Персидский залив	Падение вертолета, пожар	Вертолет марки Aerogulf Bell 212 при взлете задел одно из сооружений на нефтяной платформе Maersk Resilient. На месте аварии вспыхнул пожар, в результате которого погибли 7 человек (5 пассажиров и 2 члена экипажа).
17.09.2008 Средиземное море	Технические неполадки	На платформу упала труба, которую должны были опустить в море. Погибли 3 человека.
31.10.2008 Северное море	Утечка нефти	На нефтедобывающей платформы «Heather Alpha» произошла утечка нефти. С платформы были эвакуированы 56 человек, немногим более тридцати остались на платформе для устранения последствий аварии. Возгорания не произошло.
24.03.2009 Шельф о. Сахалин	Утечка нефти	В результате сбоя в работе одного из узлов на морской платформе "Моликпак" на лед, окружающий платформу, попало 165 литров углеводородов. Последствия аварии были ликвидированы оперативно, загрязнение моря не произошло.
01.11.2009 Тиморское море	Пожар на платформе	У северо-западного побережья Австралии произошел пожар на платформе тайландской компании PTT Exploration & Production. Пожар начался во время работ по ликвидации утечки нефти. Никто из рабочих на платформе не пострадал. Утечка нефти была обнаружена 21 августа; за этот период в море вылилось более 28 тысяч баррелей сырой нефти.
17.03.2009 Акватория о. Сахалин	Разлив нефти	На лед, окружающий платформу, попало 165 л углеводородов. Причиной разлива нефти стал сбой в работе одного из узлов. Последствия аварии были ликвидированы оперативно, загрязнение моря не произошло.
20.04.2010 Мексиканский залив	Взрыв, пожар на платформе	На буровой нефтедобывающей платформе "DeepWater Horizon" произошли взрыв метана и последующий пожар, который продолжался 36 часов, после чего затонула. 11 человек погибли и 17 пострадали. Авария сопровождалась длительным (87 дней) и масштабным (до 4,9 млн. баррелей) загрязнением нефтью акватории Мексиканского залива.
17.06.2010 Красное море	Утечка нефти	На платформе в Джебель аз-Зейт, к северу от Хургады, произошла утечка нефти. Нефть попала в воду Красного моря. Были загрязнены коралловые рифы и курортная зона Хургады. О причине возникновения и размере утечки данных нет.
02.09.2010 Мексиканский залив	Взрыв, пожар на платформе	В результате аварии на буровой установке Vermilion Oil Rig 380 возник пожар и взрыв. Выброса не произошло, т.к. на момент происшествия на платформе не велась добыча нефти. В результате взрыва пострадал 1 человек.







На буровой нефтедобывающей платформе "DeepWater Horizon" произошли **взрыв метана** и последующий пожар, который продолжался 36 часов, после чего она затонула. 11 человек погибли и 17 пострадали. Авария сопровождалась длительным (87дней) и масштабным (до 4,9 млн. баррелей ) загрязнением нефтью акватории Мексиканского залива.



**Анализ официального отчета компании BP  
(Deepwater Horizon Accident Investigation Report)  
об аварии 20.04.2010 на платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе**

Дата официальной публикации отчета о расследовании аварии – 08.09.2010 ([www.bp.com](http://www.bp.com)).

Группа расследования: более 50 специалистов компании BP и др. крупных организаций из различных областей (техника безопасности, эксплуатация, подводные работы, бурение, контроль за скважиной, цементирование, динамическое моделирование ствола скважины и системы противовыбросного превентора, анализ опасности процесса).

Во время расследования группа использовала анализ дерева отказов для определения и учета различных сценариев, режимов поломки и возможных способствующих факторов. Были выявлены 8 основных причин, повлекших за собой масштабную аварию:

1. Кольцевой цементный барьер не изолировал углеводороды.
2. Барьеры из цементного стакана не изолировали углеводороды.
3. Было принято испытание с отрицательным давлением, хотя целостность скважины не была определена.
4. Приток (поступление флюида в скважину) не был признан до тех пор, пока углеводороды не стали поступать в райзер.
5. Меры по возобновлению контроля за скважиной потерпели неудачу и не смогли вернуть контроль за скважиной.
6. Отклонение бурового дегазатора в результате привело к сдувке газа на буровую.
7. Система пожаро-газообнаружения не предотвратила возгорание углеводородов.
8. Аварийный режим противовыбросного оборудования не уплотнил скважину.



## Основные нормативные документы по оценке взрывных воздействий:

- Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений» (ФЗ № 384-ФЗ) – изложены требования об учете риска взрыва и взрывных нагрузок;
- СНиП 2.01.07 – 85\* «Нагрузки воздействия»;
- СНиП 31-03-2001 «Производственные здания»;
- СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

### Нормативно-методические и ведомственные документы:

- ГОСТ Р 12.3.047-98\* «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» (Приложение А. Метод расчета избыточного давления, развиваемого при сгорании газопаровоздушных смесей в помещении);
- ГОСТ 12.004-91\* «Пожарная безопасность. Общие требования»;
- ГОСТ 12.1.010 - 96 «Взрывобезопасность. Общие требования»;
- ПБ 09-540-03 «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»;
- РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»;
- СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003 «Методические указания по проведению анализа риска при проектировании и эксплуатации опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром» (в части оценки внутреннего взрыва);
- Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах;
- Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности.





# ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН «ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ О БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

(Принят Государственной Думой 23.12.2009 года, одобрен Советом Федерации 25.12.2009 г.)

- Настоящий Федеральный закон не распространяется на безопасность технологических процессов, соответствующих функциональному назначению зданий и сооружений. Учету подлежат лишь возможные опасные воздействия этих процессов на состояние здания, сооружения или их частей.
- *Статья 2. Основные понятия*  
• ...
- 8) механическая безопасность - состояние строительных конструкций и основания здания или сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений вследствие разрушения или потери устойчивости здания, сооружения или их части;  
• ...
- *Статья 11. Требования безопасности для пользователей зданиями и сооружениями*
- Здание или сооружение должно быть спроектировано и построено, а территория, необходимая для использования здания или сооружения, должна быть благоустроена таким образом, чтобы в процессе эксплуатации здания или сооружения не возникало угрозы наступления несчастных случаев и нанесения травм людям - пользователям зданиями и сооружениями в результате скольжения, падения, столкновения, ожога, поражения электрическим током, а также вследствие взрыва.  
• ...
- Соответствие проектных значений параметров и других проектных характеристик здания или сооружения требованиям безопасности, а также проектируемые мероприятия по обеспечению его безопасности должны быть обоснованы ссылками на требования настоящего Федерального закона и ссылками на требования стандартов и сводов правил, включенных в указанные в частях 1 и 7 статьи 6 настоящего Федерального закона перечни, или на требования специальных технических условий. В случае отсутствия указанных требований соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности, а также проектируемые мероприятия по обеспечению его безопасности должны быть обоснованы одним или несколькими способами из следующих способов:
  - 1) результаты исследований;
  - 2) расчеты и (или) испытания, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;
  - 3) моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;
  - 4) оценка риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.





# СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

Категории зданий по взрывопожарной и пожарной опасности

Категории наружных установок по пожарной опасности

Оценка пожарного риска

Методы определения категорий помещений А и Б

Методы определения категорий помещений В1-В4

Методы расчета критериев пожарной опасности наружных установок

При расчете критериев взрывопожарной опасности в качестве расчетного следует выбирать наиболее неблагоприятный вариант аварии или период нормальной работы аппаратов, при котором в образовании горючих газо-, паро-, пылевоздушных смесей участвует наибольшее количество газов, паров, пылей, наиболее опасных в отношении последствий сгорания этих смесей.

П. 1.3 СП 12.13130.2009. Настоящий свод правил не распространяется:

- на помещения и здания для производства и хранения взрывчатых веществ ( ВВ), средств инициирования ВВ, здания и сооружения, проектируемые по специальным нормам и правилам, утвержденным в установленном порядке;
- на наружные установки для производства и хранения ВВ, средств инициирования ВВ, наружные установки, проектируемые по специальным нормам и правилам, утвержденным в установленном порядке, а также на оценку уровня взрывоопасности наружных установок.



## Основные публикации по расчету взрывных нагрузок:

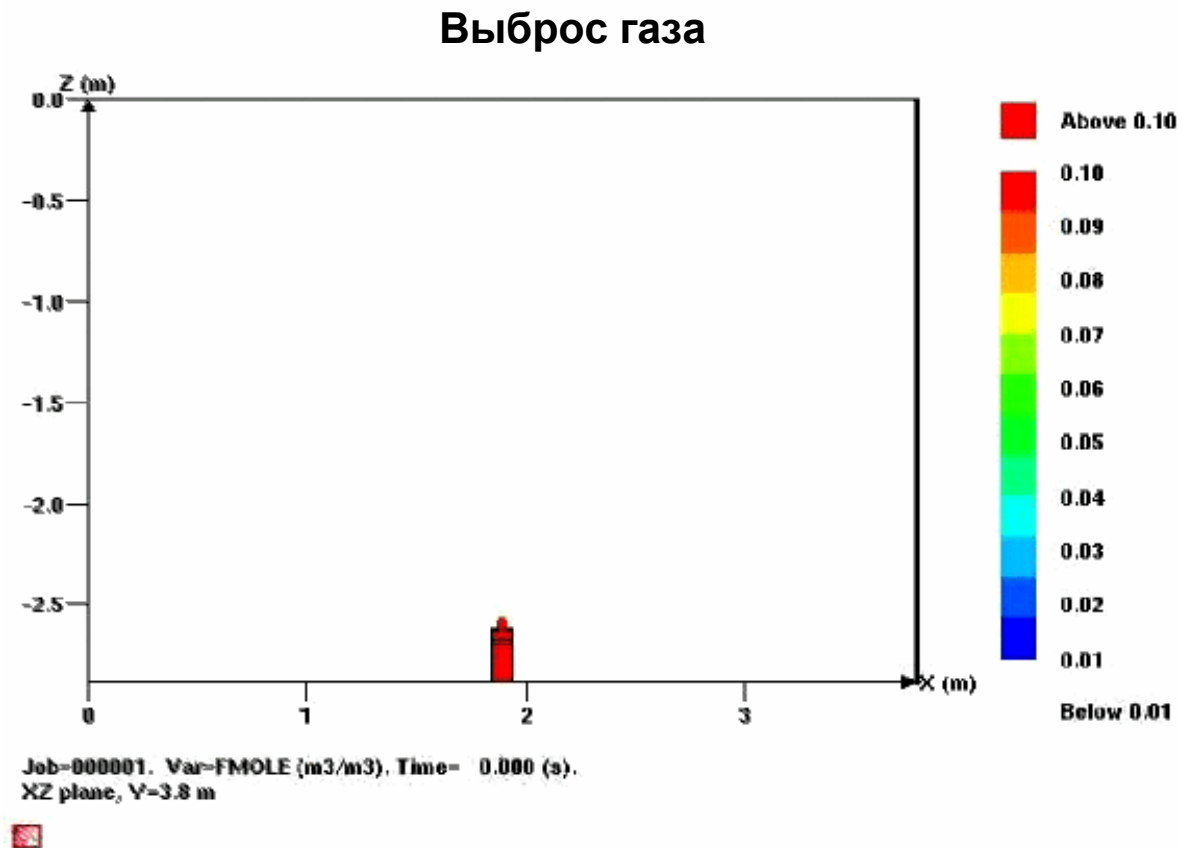
- Казеннов В.В. Динамические процессы дефлаграционного горения во взрывоопасных зданиях и помещениях. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, МГУ, 1997.
- Годжелло М.Г. Расчет площади легкобрасываемых конструкций для зданий и сооружений взрывоопасных производств. – М.: Стройиздат, 1982. – 49 с.
- Мишуев. А.В. и др. Исследование процесса взрывного горения в близких к кубической форме помещениях с учётом размещения в них технологического оборудования. Объекты гражданской обороны. Защитные сооружения: Сб. научн. тр. - №4. - М.: ЦНИИПромзданий, 1991.
- Орлов Г.Г. Легкобрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий. - М.: Стройиздат, 1987.
- Пилюгин Л.П. Конструкции сооружений взрывоопасных производств. - М.: Стройиздат, 1988.
- Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций , 2000.
- Пилюгин Л.П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов, 2010.
- Мольков В.В., Некрасов В.П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения // Физика горения и взрыва. - 1981. - Т. 17, № 4. - С. 17-24.
- Мишуев. А.В. и др. Исследование процесса взрывного горения в близких к кубической форме помещениях с учётом размещения в них технологического оборудования. Объекты гражданской обороны. Защитные сооружения: Сб. научн. тр. - №4. -М.: ЦНИИПромзданий, 1991.
- Комаров А.А. Докторская диссертация «Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения».



# Моделирование аварийной ситуации с использованием программного комплекса FLACS (Flame Acceleration Simulator)\*

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

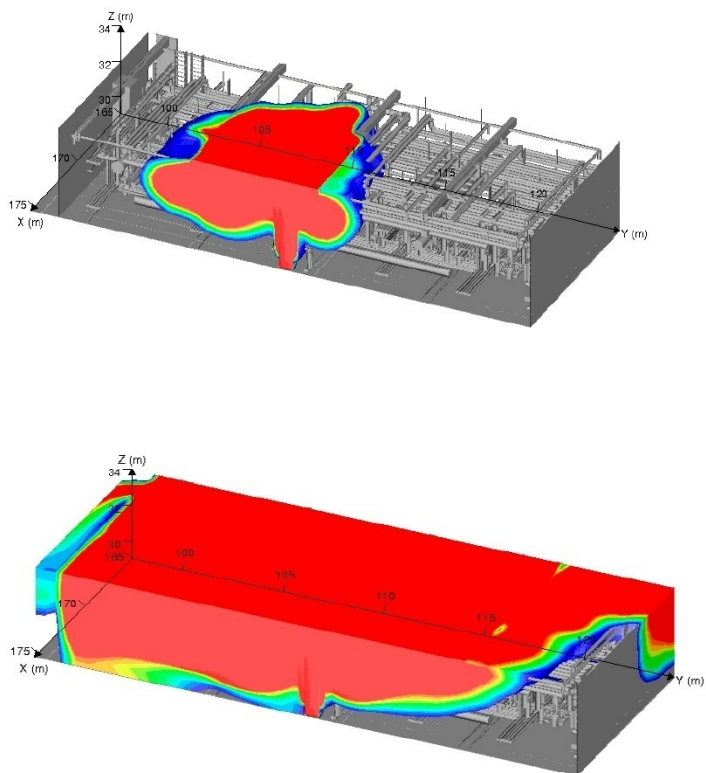
\* - на примере выброса газа





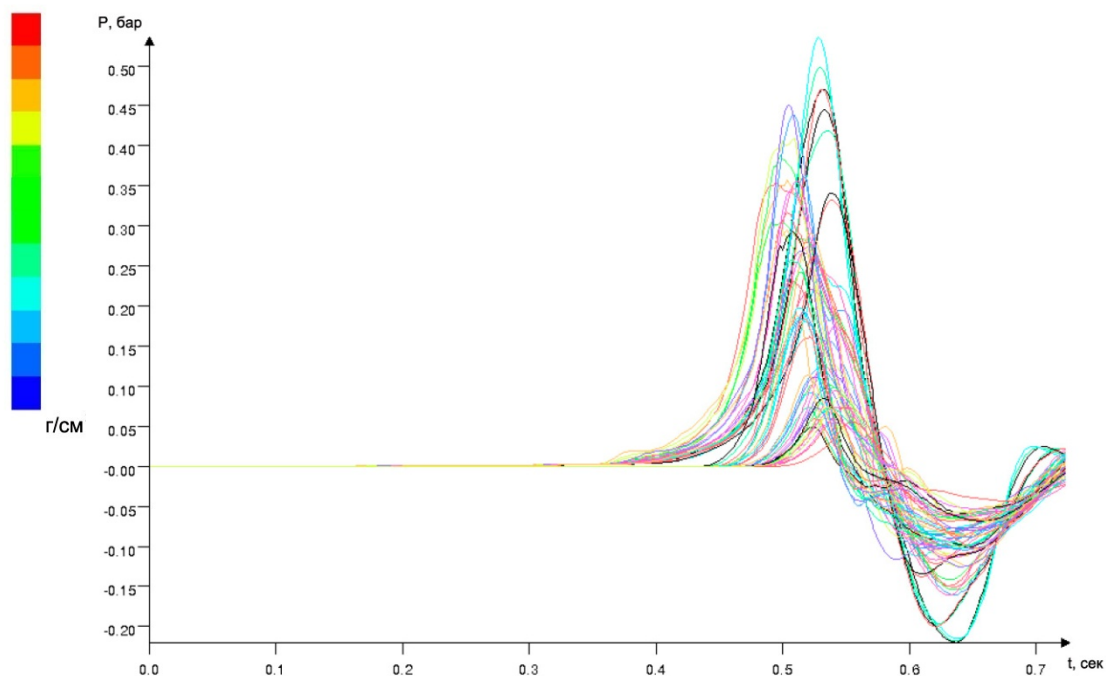
## Пример рассеяния газа в помещении\*

(начальная скорость утечки 15 кг/с,  
через 5с и 30с соответственно)

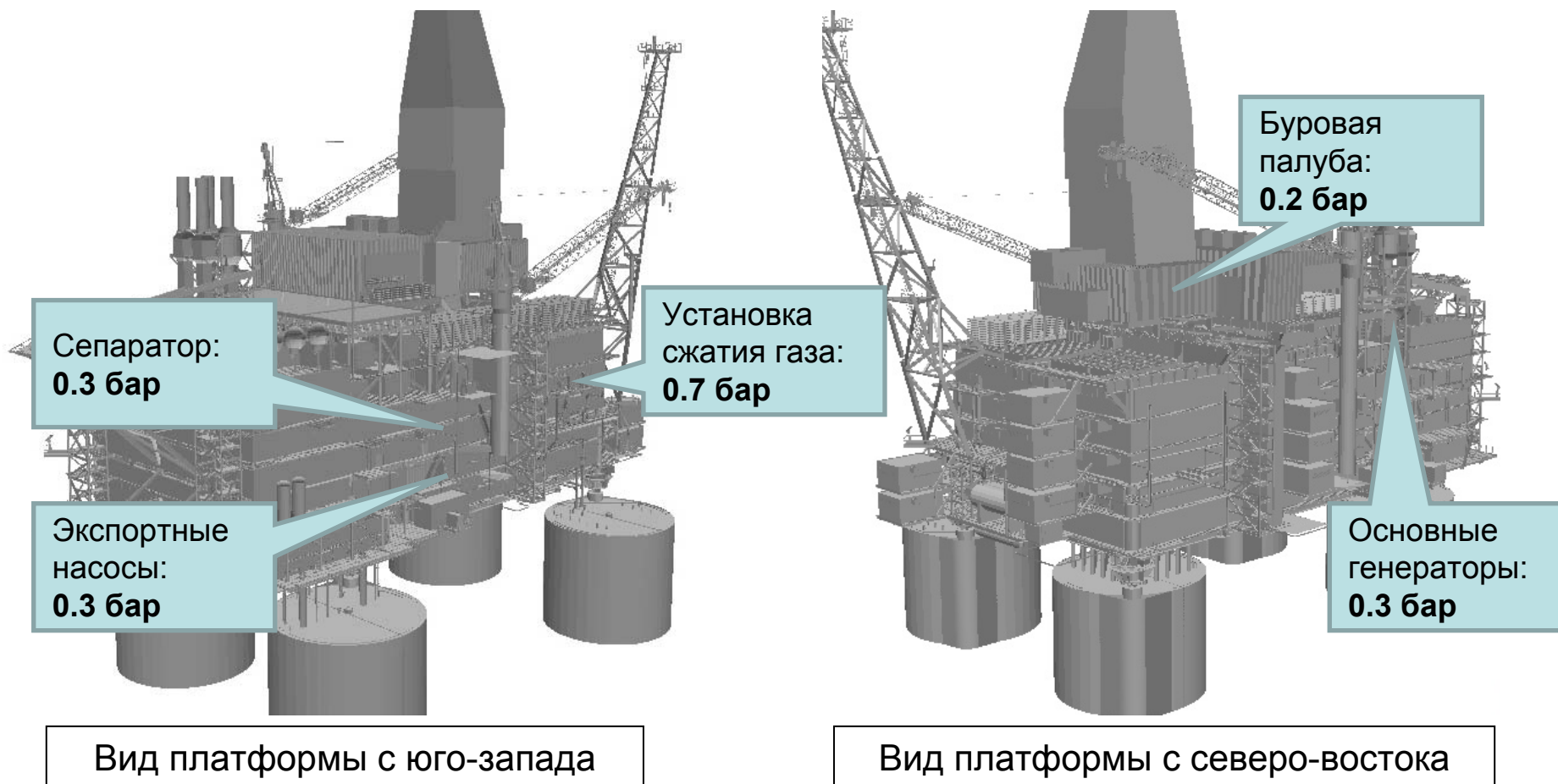


## Влияние места расположения источника инициирования взрыва\*

(взрыв контролируется по 64 контрольным точкам)



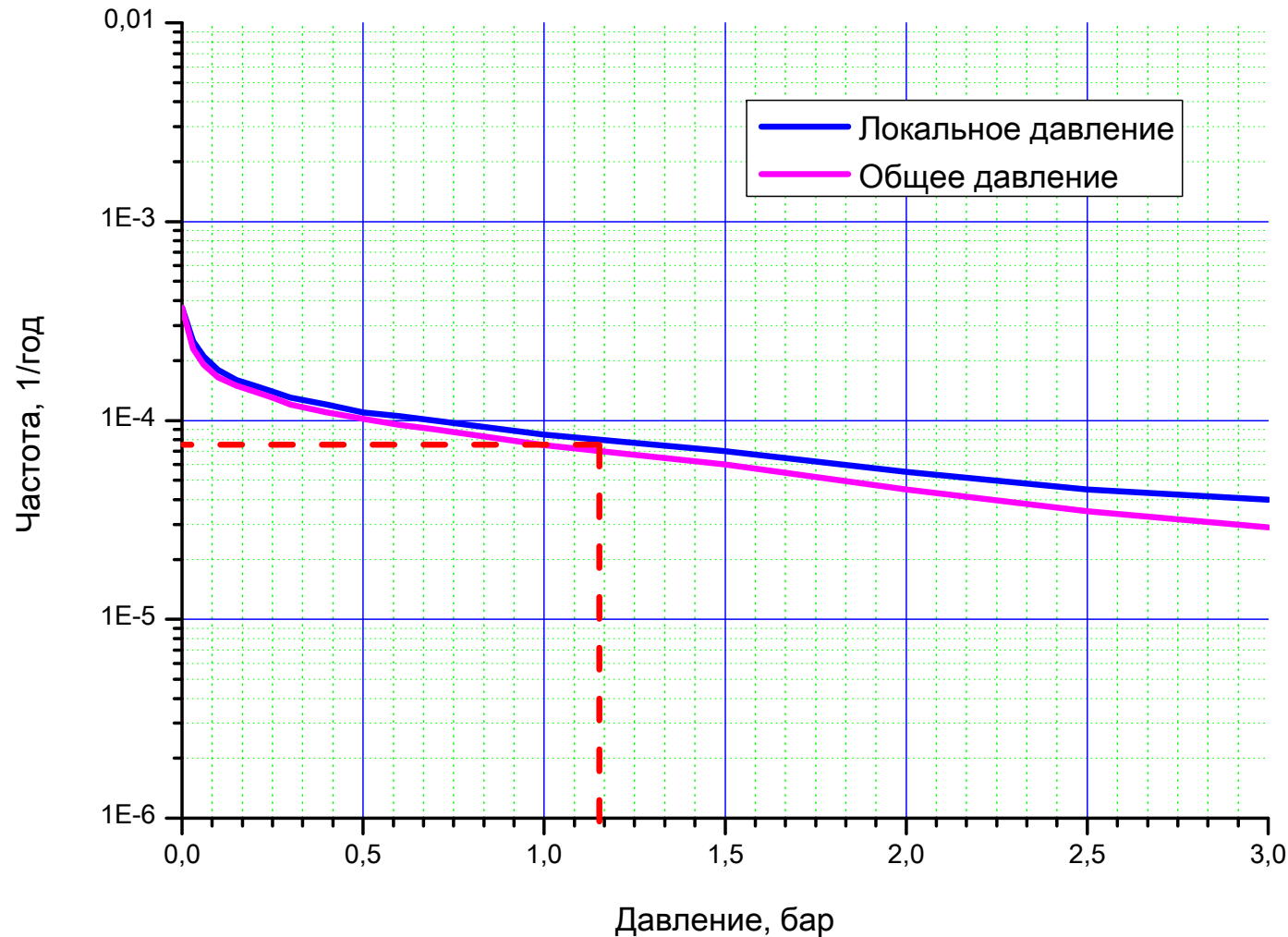
# Результаты базового расчета взрывных нагрузок нефтегазодобывающей платформы\*



\* - По материалам проектной документации платформы Аркутун-Даги (Сахалин-1) - рассчитано с учетом требований NOR-SOK Z-013, использованием FLACS и ExproRAM.



# Анализ результатов базового расчета взрывных нагрузок модуля нефтегазодобывающей платформы\*

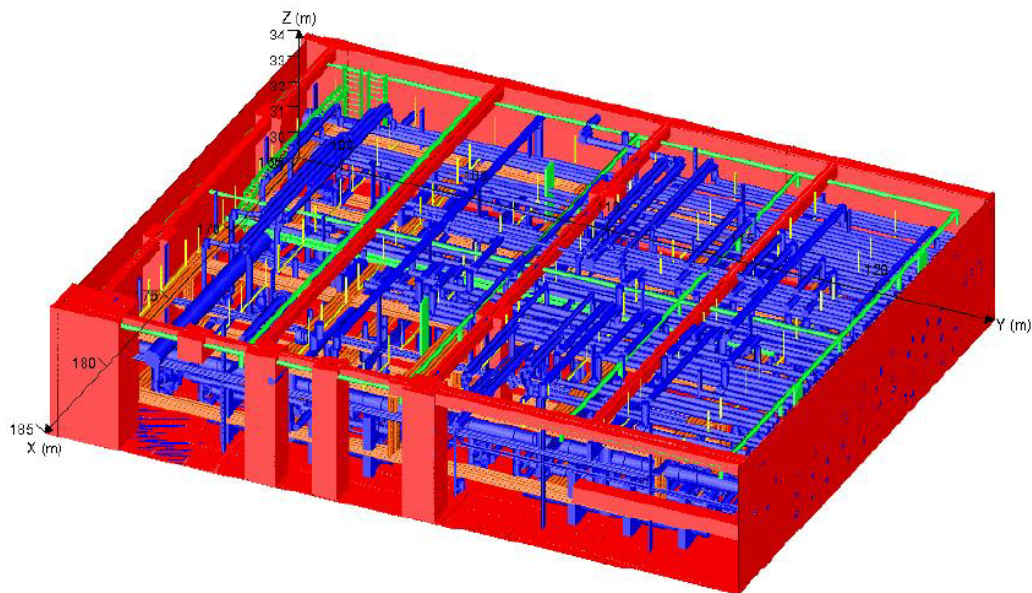


\* - По материалам проектной документации платформы Аркутун-Даги (Сахалин-1) - рассчитано с учетом требований NOR-SOK Z-013, использованием FLACS и ExproRAM.



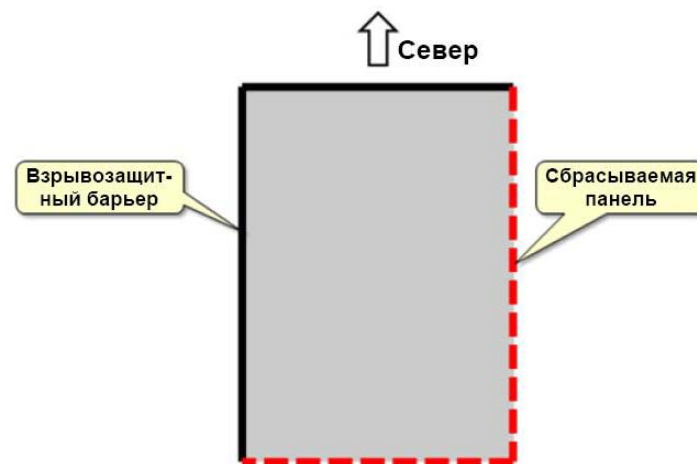


На примере модуля манифольдной зоны морской нефтегазодобывающей платформы Аркутун-Даги был проведен расчет взрывных нагрузок по Российским методикам (СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003) и сравнение полученных результатов с результатами расчета по зарубежным методикам.



Размеры модуля:  
высота - 5,5 м;  
длина - 25,5 м;  
ширина - 20,5 м.

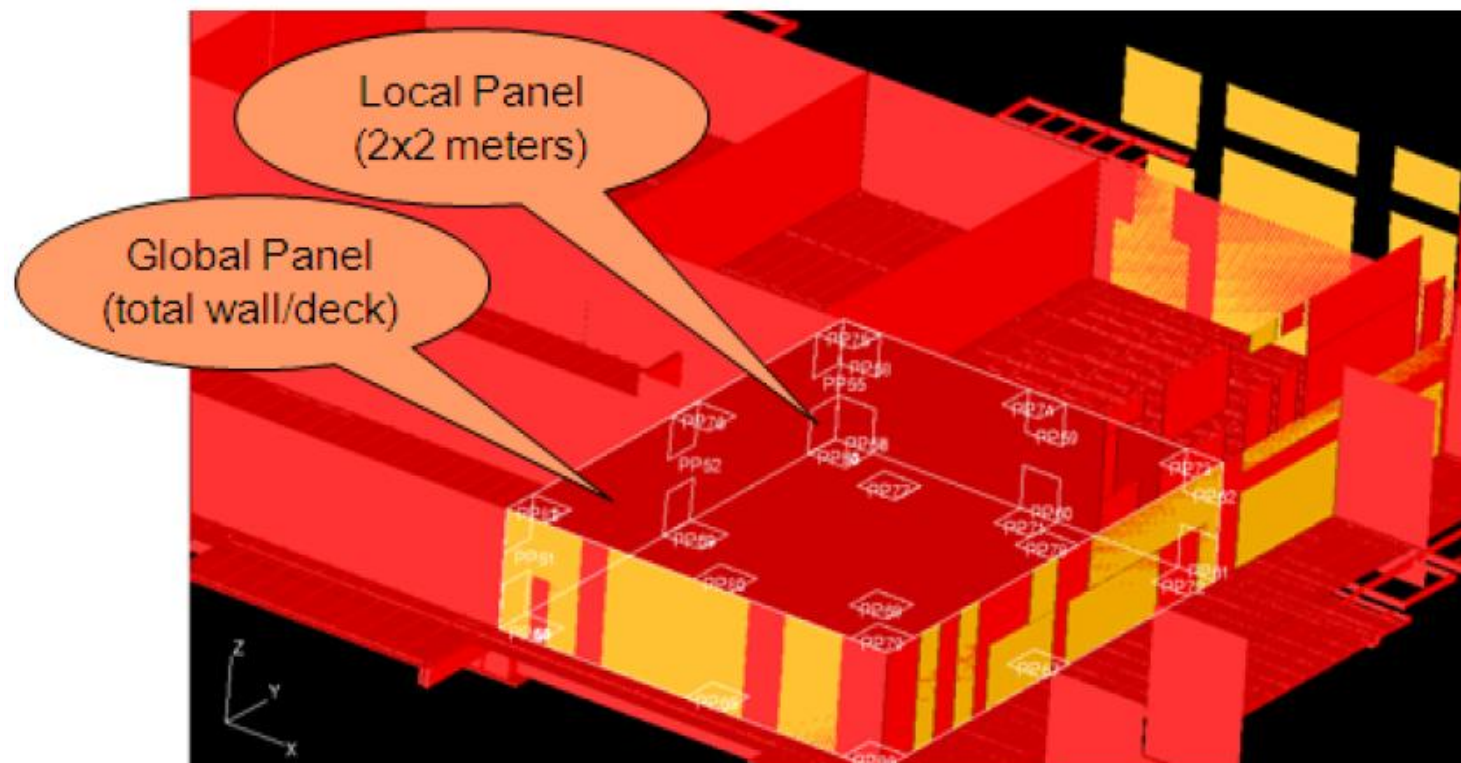
Площадь боковых поверхностей составляет 112,75 м<sup>2</sup>  
(южная/северная стена) и 140,25 м<sup>2</sup> (западная/восточная стена).



На южной и восточной стенах модуля манифольдной зоны расположены легкобрасываемые конструкции. ЛСК не занимают всю боковую поверхность, а составляют 62-68 % площади соответствующей боковой стены.

На южной стороне их площадь составляет 76,75 м<sup>2</sup>, а на восточной 87 м<sup>2</sup> (общая площадь ЛСК для данного модуля – 163,75 м<sup>2</sup>).

ЛСК срабатывают при избыточном давлении 0,05 атм.



## Расчет давления взрыва согласно Комарову А.А. (МИСИ) / СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \cdot S(t) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot U_n - \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_i}} \cdot S_{np} \cdot f(t, \Delta P)}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}} \cdot P(t)$$

Динамика изменения давления (нагрузок) при внутренних дефлаграционных взрывах

$$\Delta P \approx 0,5 \cdot \rho_j \cdot U_H^2 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\mu}\right)^2 \cdot \left(\frac{S(t)}{S_{np}}\right)^2$$

Упрощенное соотношение для определения текущего значения давления

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = V(t) \\ \frac{dV(t)}{dt} = \frac{g \cdot (\Delta P - K \cdot \Delta P_{инер})}{\Delta P_{инер}} \end{cases}$$

Дополнительная система уравнений для определения функциональной зависимости вскрытия предохранительных конструкций в помещениях, оборудованных ЛСК

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \cdot S(t) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot U_n - \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_i}} \cdot S_{np}}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}} \cdot P(t)$$

Динамика нарастания давления (нагрузок)

$$\Delta P_{max} = 0,5 \cdot \rho_{1,2} \cdot U_n^2 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\mu}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_{max}}{S_{np}}\right)^2$$

Максимальное давление в здании при мгновенном вскрытии сбросных проемов (при незначительных уровнях взрывного давления  $\Delta P \ll P_{max}$ )

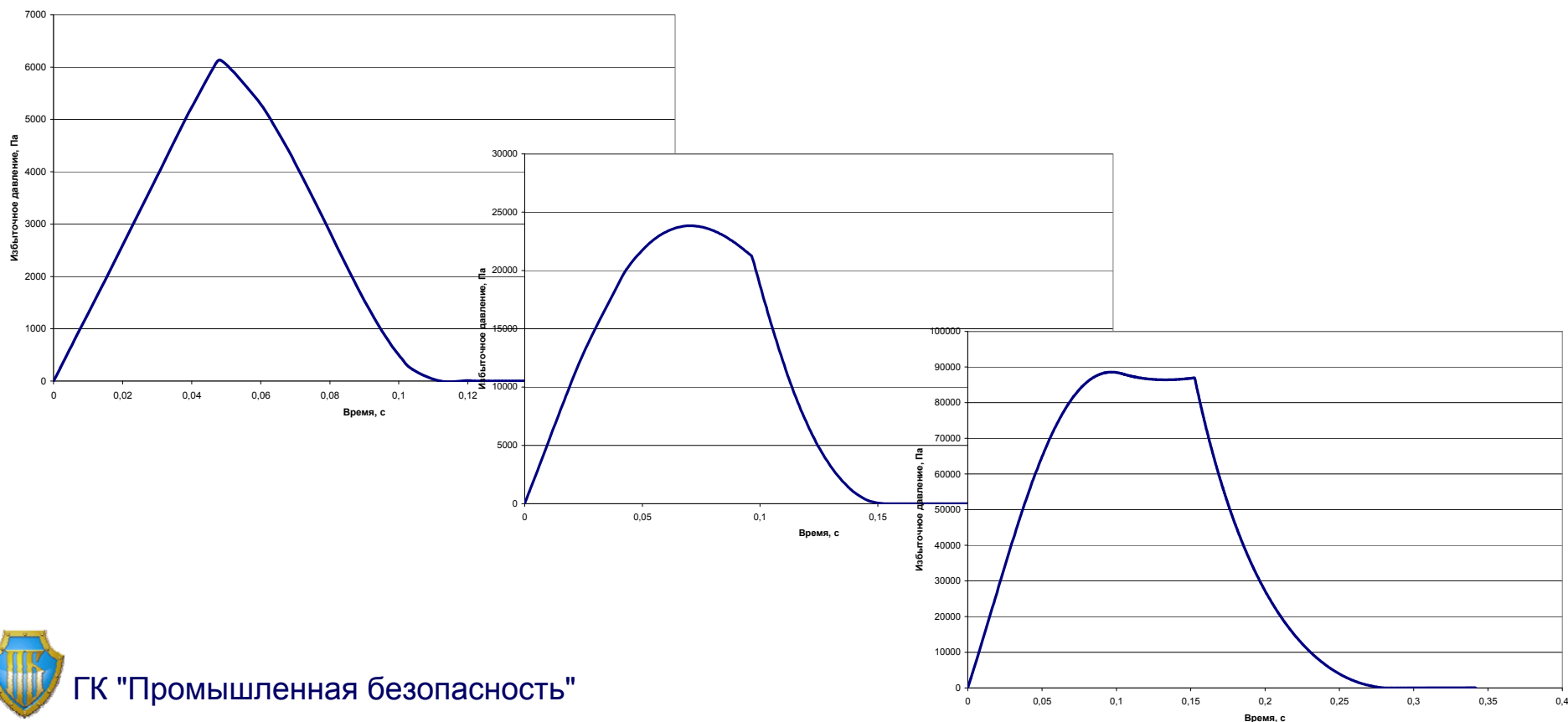




Расчеты по диссертации Комарова А.А. / СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003 были проведены для трех значений размеров облаков ТВС в модуле:

- для облака, которому соответствует минимальное значение избыточного давления, рассчитанного по FLACS/ExploRAM;
- для облака, которому соответствует среднее значение из диапазона избыточных давлений, рассчитанных по FLACS/ExploRAM;
- для облака, которому соответствует максимальное значение избыточного давления, рассчитанного по FLACS/ExploRAM.

Динамика изменения давления в помещении с течением времени для трех рассмотренных случаев представлена ниже.



## Результаты сравнительных расчетов избыточного давления

Расчет	Избыточное давление, рассчитанное по FLACS/ExploRAM, бар	Избыточное давление, рассчитанное по СТО РД Газпром 39-1.10.-084-2003, *, бар
объем облака 103,1 м <sup>3</sup> (7,2x3,6x5,5 м)	0,147	0,075
объем облака 466,8 м <sup>3</sup> (14,5x7,2x5,5 м)	1,447	0,250
объем облака 1147,8 м <sup>3</sup> (22,9x11,4x5,5 м)	12,378	0,899

Примечание.

\* - для ситуации, когда фронт пламени движется в горизонтальном направлении.



# Выводы

1. Согласно требованиям Технического регламента «О безопасности зданий и сооружений» безопасная эксплуатация объектов, на которых горючие вещества обращаются в замкнутых / полужамкнутых помещениях, требует обоснования взрывоустойчивости с учетом вероятности взрывных нагрузок.

2. В России оценка взрывоустойчивости основана на использовании детерминистских методов оценки давления взрыва согласно СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

Несмотря на ряд научных публикаций, нормативные методики оценки взрывоустойчивости, учитывающие вероятностных характер нагрузок, отсутствуют.

3. Проведен анализ зарубежных подходов обоснования взрывоустойчивости на примере проектирования нефтегазобобывающих платформ.

Сравнительные расчеты на показали, что значения избыточного давления взрыва, рассчитанные по программному комплексу FLACS, в рассмотренных случаях выше, чем результаты, рассчитанные по российским методикам.

В этой связи необходимо дальнейшее совершенствование методологии оценки взрывных нагрузок на основе вероятностных подходов.

