

УДК 622.691.2/4.004.4

**А.В. Мельников, В.С. Сафонов**

## Методологические аспекты обоснования показателей взрывопожароустойчивости при авариях на морских платформах

**Ключевые слова:**

анализ риска, морская платформа, авария, взрыв, математическое моделирование.

**Keywords:**

risk analysis, sea rig, accident, explosion, mathematical simulation.

Первые нефтяные морские платформы появились в конце 1950-х гг. у побережья Луизианы, где глубина моря, как правило, не превышает 180 м. В настоящее время в мире эксплуатируется или находится в стадии проектирования и строительства более 9,5 тыс. морских плавучих и опорных платформ различных типов. Плавучие платформы применяются при глубинах моря уже более 3000 м. Основными центрами морской добычи углеводородов на сегодня являются Северное море и Мексиканский залив. Нефтедобыча в Северном море берет свое начало с разработки месторождения Экофиск (Ekofisk) компанией «Филипс Петролеум» в 1969 г. В то же время компания «Амоко» открыла месторождение Монтоз (Montrose) в 217 км восточнее Абердина, и после открытия еще нескольких месторождений нефти и газа в Норвегии развернулся самый масштабный в истории инвестиционный проект по их освоению.

После ряда крупных аварий на морских платформах в Северном море с 1978 по 1980 г. была сформирована Программа улучшения безопасности морских платформ, поддерживаемая компаниями BP, Elf, Esso (Exxon), Mobil, Norsk Hydro и Statoil. В рамках этой программы институт Кристиана Михельсона (СМИ) провел ряд экспериментов по исследованию горения газовоздушных смесей (ГВС) в технологически загроможденном пространстве и предложил ряд организационных и технических решений, направленных на снижение взрывных нагрузок при таких событиях. Авария на платформе Piper Alpha в Северном море в 1988 г. явилась, по существу, ключевым моментом в понимании необходимости форсированного развития научно-методической базы обеспечения безопасности морских платформ и повлекла за собой пересмотр процедур их проектирования и эксплуатации, а также обязательность использования методов количественного анализа риска на всех этапах жизненного цикла такого рода объектов.

Внедрение методов количественного анализа риска при проектировании морских платформ потребовало разработки соответствующей методологии, инструментов оценки последствий аварийных событий и установления критериев приемлемости риска, зафиксированных в нормативных документах ряда стран в виде предельной частоты отказа выполнения основной функцией безопасности своей задачи при возникновении аварии. При этом одной из важнейших функций безопасности является недопущение распространения (каскадного развития) аварии за пределы аварийного модуля [1]. В силу того что наиболее опасными по последствиям авариями на морских платформах являются пожары и взрывы ГВС, при проектировании морских платформ особое внимание уделяется сохранению работоспособности указанной функции безопасности при наступлении таких событий.

### Моделирование горения ГВС в загроможденном пространстве

Крупномасштабные эксперименты по горению ГВС в технологических модулях морских платформ [2–6] показали, что характеристики воздушных волн сжатия (ВВС) при взрывах ГВС в первую очередь зависят от следующих факторов:

- тип топлива и окислителя;
- размер облака ГВС и пространственное распределение в нем топлива;

- местоположение и мощность источника зажигания ГВС;
- ограниченность, геометрические параметры пространства и степень его «загромождения»;
- местоположение и характеристики устройств для сброса избыточного давления;
- набор дополнительных средств для снижения последствий аварий.

Первым инструментом для детального анализа взрыва ГВС в загроможденном пространстве, учитывающим указанные факторы, был FLACS-86, включающий в геометрическую модель пространства только крупные технологические объекты, что приводило к занижению расчетных значений избыточного давления при взрыве ГВС. Результаты многочисленных экспериментов, проводимых СМІ вплоть до 2003 г. в кооперации с нефтегазовыми компаниями BP, Conoco, Elf, Exxon, Gasunie, Gaz de France, Mobil, Norsk Hydro, Philips, Statoil и регулятивными организациями Health & Safety Executive (Великобритания), Norwegian Petroleum Directorate (NPD, Норвегия) и BMFT (Германия), были использованы для улучшения программного кода FLACS, первая коммерческая версия которого была выпущена в 1996 г.

В 1997 г. NPD была сформирована рабочая группа по внедрению результатов экспериментальных исследований горения ГВС в практику проектирования морских платформ. В результате совместных усилий специ-

алистов компаний Norsk Hydro, Statoil и Saga Petroleum был разработан Порядок вероятностной оценки взрывов, позднее вошедший как приложение G в состав нормативного документа NORSOK Z-013 «Risk and emergency preparedness analysis» [7].

На основе Порядка вероятностной оценки взрывов был создан единый базис проведения вероятностной оценки взрывов, включающий необходимый состав этапов проведения анализа и требования к проведению каждого из этих этапов (рис 1). Основные требования анализа:

1) при описании процессов естественной и искусственной вентиляции, дисперсии газа и взрыва:

а) для моделирования дисперсии и взрыва ГВС должен использоваться верифицированный программный комплекс на основе CFD;

б) при моделировании дисперсии газа должно учитываться изменение во времени параметров источника и условий рассеяния;

в) должно приводиться обоснование и детальное описание приближений, направленных на снижение объема расчетов;

г) совокупность рассматриваемых сценариев должна включать все значимые комбинации режимов вентиляции, динамики, общих объемов, местоположений и направлений утечек углеводородов;

д) вероятность воспламенения ГВС должна рассматриваться как вероятностная функция с учетом времени.

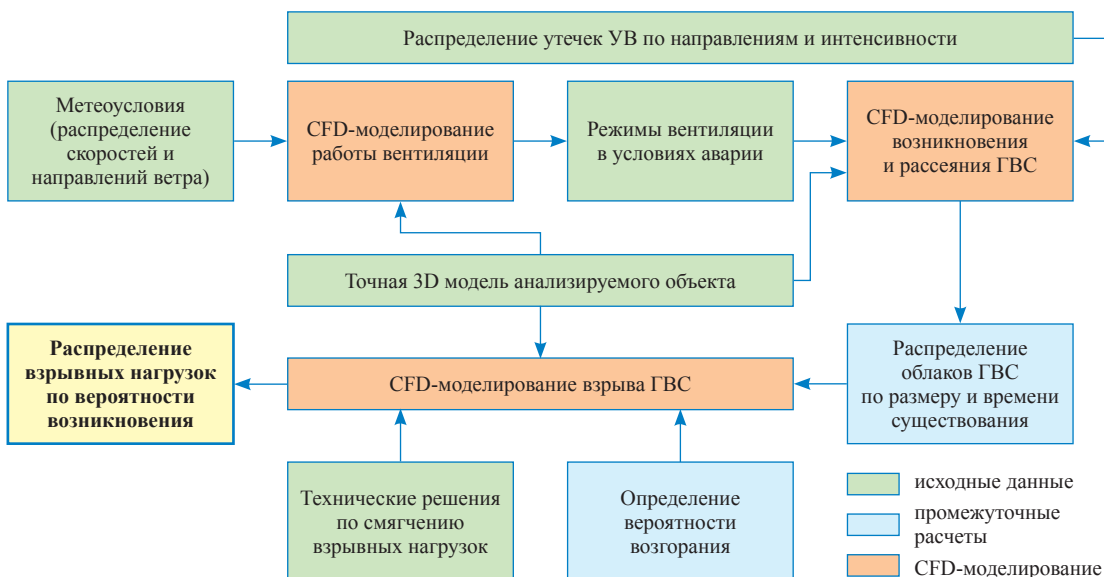


Рис. 1. Общая последовательность этапов вероятностной оценки взрывов

2) «прозрачность» расчетов должна быть обеспечена тщательным документированием исходных данных и промежуточных результатов:

- а) по частотам и продолжительности утечек;
- б) вероятности воспламенения;
- в) условиям дисперсии ГВС;
- г) частотам образования облаков ГВС определенного размера;
- д) зависимости избыточного давления от размера облака ГВС и др.

Дальнейшее развитие этих требований было реализовано в виде отдельного методического аппарата количественного анализа рисков аварий на морских платформах – методологии вероятностной оценки взрывов, на сегодня получившей самое широкое применение при проектировании объектов нефтегазовой отрасли.

Рассмотрим требования к проведению этих этапов более подробно.

### Исходные данные

#### 3D-модель анализируемого объекта

Как было отмечено выше, точное представление геометрии объекта является важнейшим фактором, оказывающим прямое влияние на результаты проводимого анализа.

Типовым способом реализации геометрии объекта в расчетном комплексе является его импортирование из САД-систем, повсеместно применяемых при проектировании морских объектов. При проведении анализа на ранних стадиях, когда доступно только принципиальное расположение технологического оборудования, используется метод АСМ (Anticipated Congestion Method, метод прогнозируемого загромождения пространства), представляющий формализованную процедуру, позволяющую добавлять недостающие детали геометрической модели на основании технологических схем, перечня оборудования и опыта предыдущих проектов [8, 9].

Требуемый для расчета размер расчетного домена зависит от стадии анализа и уменьшается от моделирования работы вентиляции (захватывая значительное расстояние вокруг установки) к моделированию взрыва ГВС, при котором размер домена ограничен установкой или ее изолированной частью.

### Метеоусловия

Минимальное количество учитываемых в анализе направлений ветра – 8, скоростей ветра – 2. Рекомендуемые значения – 12 и 3 соответственно.

### Режимы вентиляции в условиях аварии

Первоначальные режимы работы вентиляции определяются соответствующими нормативными документами/проектной документацией, при этом в работе [8] рекомендовано рассматривать до 7 режимов вентиляции в аварийных условиях, отличающихся числом воздухообменов в час и временем перехода на другой режим работы. В дальнейшем оптимизация режимов вентиляции производится по результатам анализа дисперсии ГВС с общей целью уменьшения размеров (объема) и времени существования взрывоопасного облака газа.

### Распределение утечек

#### по направлениям и интенсивности

Аварийные массовые расходы рассчитываются индивидуально для каждой технологической системы, основываясь на характерном для нее распределении диаметров трубопроводов, фланцев и т.п. (эквивалентных размеров отверстий). Для целей моделирования аварийные массовые расходы группируются, как правило, по следующим категориям (кг/с): 0,1–0,5; 0,5–1; 1–2; 2–4; 4–8; 8–16; 16–32; 32–64; 64–128; 128–256; 256–512; 512–1024; 1024–2048 [7]. Использование первых девяти категорий типично при анализе дисперсии на морских объектах, в то время как крупные утечки, возникающие при разрывах на полное сечение трубопроводов большого диаметра, нередко исключаются из рассмотрения ввиду крайне низкой вероятности их возникновения. Утечки с интенсивностью менее 0,1 кг/с принимаются во внимание только в случаях, когда моделирование работы вентиляции показало наличие «застойных» зон на платформе, где возможно скопление значимых объемов ГВС даже при небольших утечках.

Для получения репрезентативного набора размеров облаков ГВС необходимо моделировать, как минимум, три места утечки в анализируемом домене, каждая из которых протекает (распространяется) в четырех направлениях (в работе [7] рекомендовано моделировать семь направлений утечек, в том числе навстречу преимущественному направлению движения воздуха в нормальном режиме работы вентиляции).

## Технические решения по «смягчению» взрывных нагрузок

К типовым решениям по смягчению взрывных нагрузок относятся легкобрасываемые перекрытия (панели/жалюзи) и распыление мелкодисперсной воды в облаке ГВС. Исследование влияния этих мер производится на последнем этапе работы в виде анализа чувствительности взрывных нагрузок к их применению. При этом важно иметь в виду, что в ряде случаев из-за конструктивных особенностей платформы или условий эксплуатации применение легкобрасываемых панелей может быть неэффективным, а распыление мелкодисперсной воды создавать негативный эффект из-за увеличения общей турбулизации облака ГВС до его воспламенения.

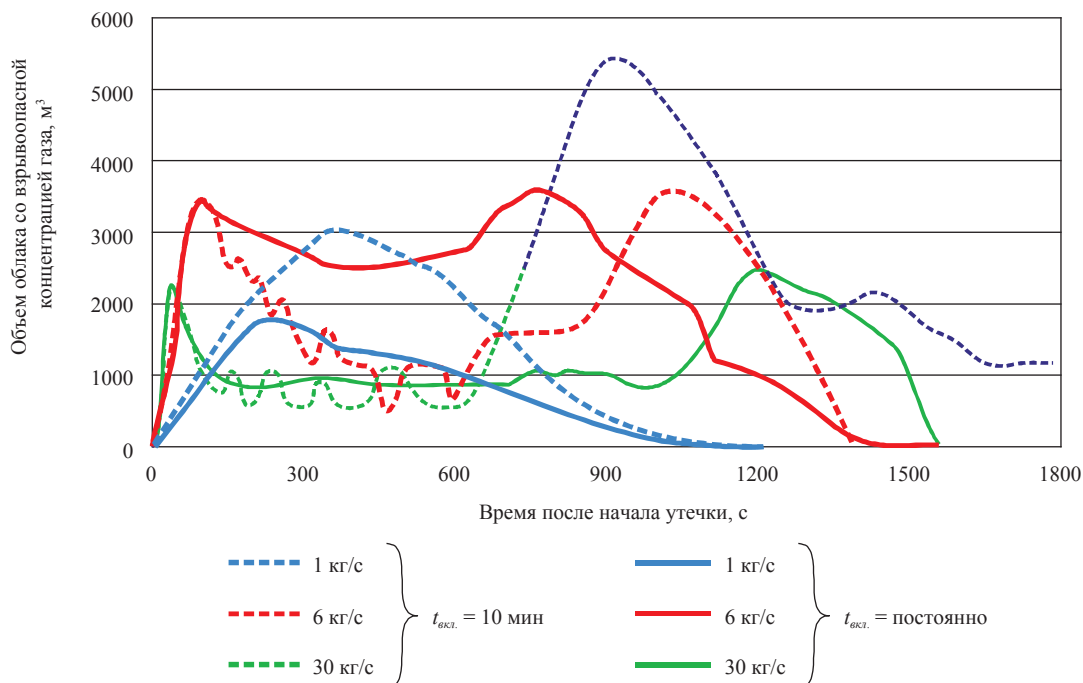
## CFD-моделирование

Современная практика вероятностной оценки взрывов не предъявляет жестких требований непосредственно к процессу моделирования вентиляции, дисперсии газа и взрывов ГВС – эти требования формируются необходимым набором данных и техническими особенностями самих программных комплексов, использующихся для этих целей.

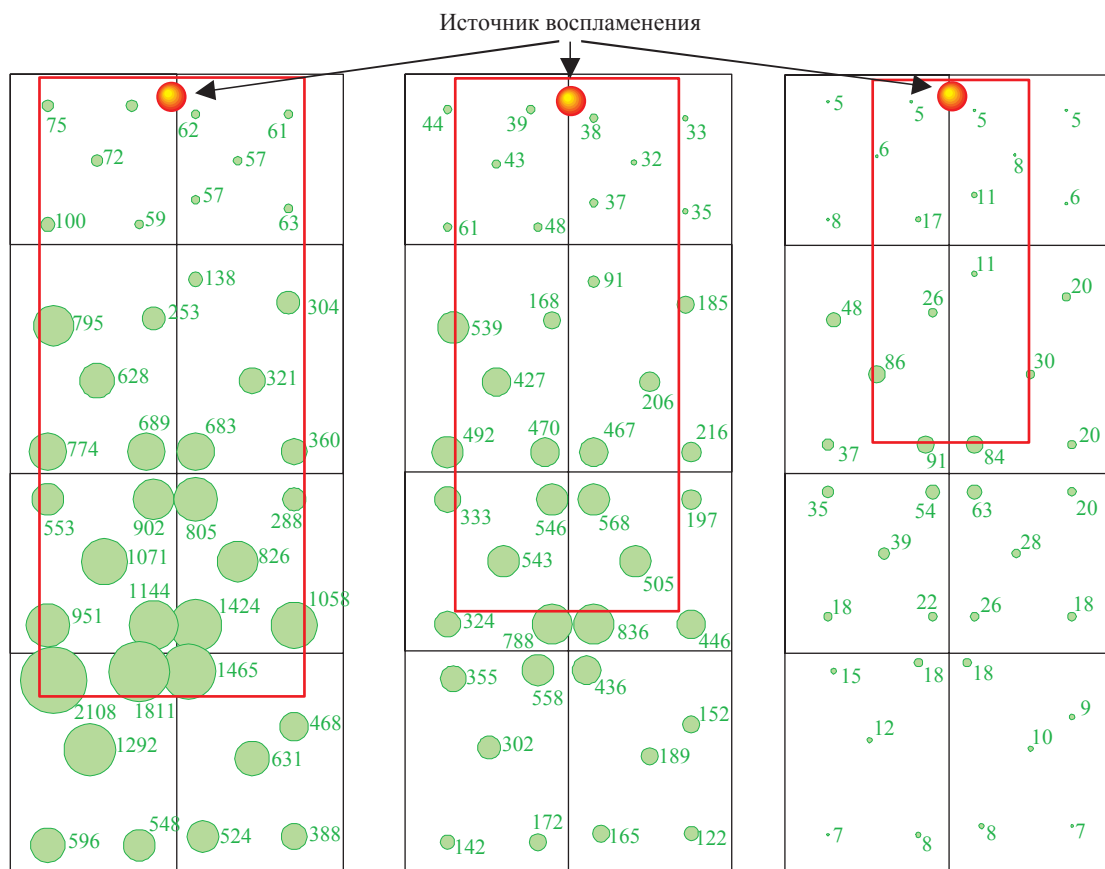
При этом моделирование рассеяния облака ГВС является основным этапом вероятностной оценки взрывов, определяющим ключевые параметры анализа – размер облака ГВС и время его существования, динамично изменяющиеся в различных условиях вентиляции (рис. 2).

Характерный рост размера облака при включении вентиляции (см. рис. 2) или при увеличении интенсивности ее работы связан с притоком воздуха и разбавлением им ГВС до взрывоопасных концентраций. Анализ режимов вентиляции особенно важен на платформах с системой винтеризации технологических модулей, так как именно характеристики облака ГВС и, как следствие, вероятность его воспламенения оказывают определяющее влияние на частоту возникновения и величину избыточного давления при авариях. Это хорошо иллюстрируется результатами моделирования взрыва ГВС на технологической палубе FPSO [8] (рис. 3).

В целом, считается достаточным моделирование взрыва семи облаков ГВС, расположенных в 10 местах анализируемой платформы/модуля [8], но эти цифры, разумеется, варьируются исходя из технологической специфики анализируемого объекта и стадии проекта.



**Рис. 2. Зависимость размера облака ГВС с взрывоопасной концентрацией от интенсивности утечки и режима вентиляции для одной из морских платформ в арктическом исполнении (t<sub>вкл.</sub> – время включения вентиляции после идентификации аварии)**



**Рис. 3. Распределение избыточного давления на технологической палубе FPSO при возгорании облака ГВС разных размеров (красный прямоугольник), 1 ед. соответствует 0,1 кПа**

Положение источника воспламенения и его функция также оказывают существенное влияние на результаты моделирования, что нашло отражение в требовании нормативных документов [7] об использовании моделей источника воспламенения с изменяющейся во времени вероятностью срабатывания (рекомендуемая модель источника воспламенения описана в работе [10] и широко применяется в практике вероятностной оценки взрывов) и моделировании взрыва облака ГВС, как минимум, при трех точках воспламенения: в центре, на краю и в месте наибольшей вероятности воспламенения облака.

### Вероятностная оценка взрывов

В схематичном виде структура требований к проведению вероятностной оценки взрывов на каждом из этапов представлена в табл. 1.

Нетрудно заметить, что учет этих требований в полном объеме ведет к необходимости проведения нескольких миллионов симуляций, что является нереалистичной величиной.

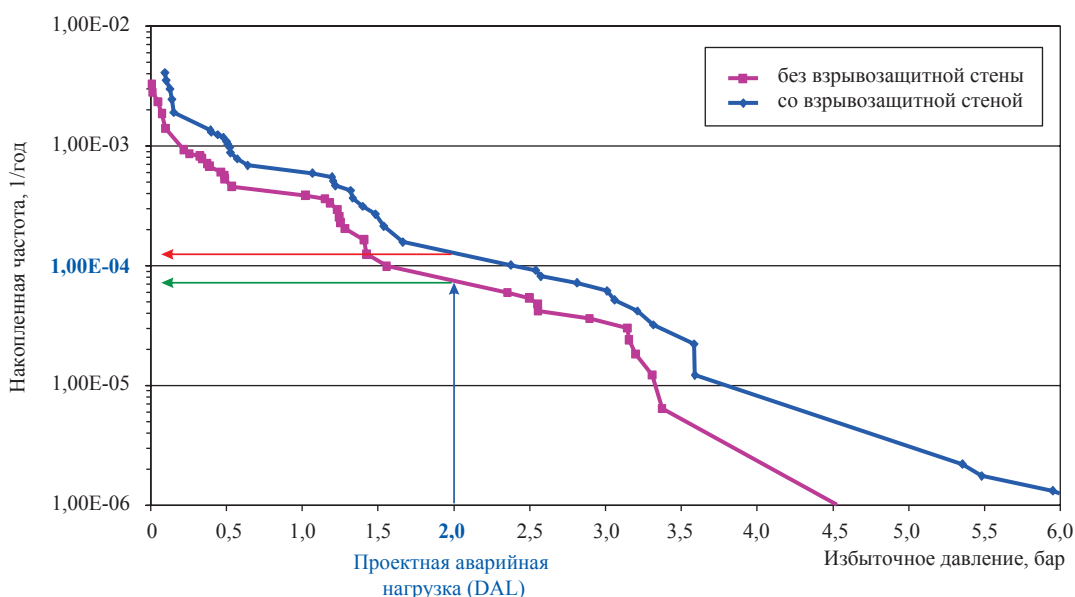
На практике количество симуляций для крупной морской платформы редко превышает 1 тысячу, в некоторых случаях, например на стадии концептуальной проработки (Pre-FEED), сокращаясь до 100–200. Столь радикальное сокращение количества расчетов требует от исполнителя глубоких знаний в области анализа риска, четкого документирования принимаемых допущений и понимания последствий их использования и, безусловно, вносит определенную погрешность в получаемый результат. К сожалению, на данном этапе развития методологии вероятностной оценки взрыва эта процедура трудноформализуема и, несмотря на определенные успехи в этом направлении [11], в значительной мере зависит от опыта и квалификации исполнителя.

В результате реализации указанной совокупности расчетов исполнитель получает набор пар чисел: частота – избыточное давление, представляемое в виде зависимости накопленной частоты возникновения взрывных нагрузок от ее величины. Отражение результатов

Таблица 1

**Структура требований к проведению вероятностной оценки взрывов**

№	Исходные данные / этап анализа	Требования к исходным данным / этапу анализа
1	3D модель объекта	CAD-геометрия, метод прогнозируемого загромождения пространства
2	Моделирование вентиляции	3 скорости ветра, 12 направлений ветра
3	Моделирование рассеяния облака ГВС	3 места утечки, 7 направлений утечки, 9 массовых расходов, 7 режимов вентилирования
4	Моделирование взрыва ГВС	7 размеров облака ГВС, 10 мест возникновения облака ГВС, 3 точки воспламенения
5	Моделирование источника возгорания	Модель источника воспламенения с изменяющейся во времени вероятностью срабатывания



**Рис. 4. Зависимость накопленной частоты возникновения избыточного давления от его величины для случаев с наличием и отсутствием взрывозащитной стены на стационарной платформе открытой архитектуры**

в таком виде позволяет наглядно продемонстрировать достаточность проектных решений для обеспечения требуемого нормативными документами уровня промышленной безопасности, а также оценить эффективность мероприятий, направленных на снижение величины и частоты возникновения взрывных нагрузок (на рис. 4 – это превышение накопленной частоты возникновения взрывных нагрузок выше проектной аварийной нагрузки (DAL), установленной в 2 бар, величины  $10^{-4}$ ).

Современная методология вероятностной оценки взрыва формировалась на протяжении последних 25 лет, на пути своего развития совершенствуя отдельные части методического аппарата. Важность использования при коли-

чественном анализе риска изложенного в настоящей работе подхода продемонстрирована сравнением оценок взрывных нагрузок, полученных с использованием методов, применявшихся на различных этапах развития методологии [8]:

1) полноценная вероятностная оценка взрыва с использованием неизменяющегося во времени размера облака ГВС. Недостатками такого метода являются:

- использование при моделировании взрыва заведомо большего по объему облака ГВС;
- ограниченное использование модели источника воспламенения с изменяющейся во времени вероятностью срабатывания;



- некорректный учет непродолжительных утечек, дающих основной вклад в частоту возникновения относительно малых взрывных нагрузок;

- неучет большинством методик по расчету характеристик установившегося процесса рассеяния облака газа реальной геометрии окружающего пространства;

2) вероятностная оценка взрыва с использованием упрощенных методов расчета рассеяния облака ГВС. Отличие этого метода от предыдущего заключается в эквивалентировании неоднородного по составу облака ГВС областью пространства с тем же количеством газа, но в ГВС стехиометрического состава. К недостаткам можно отнести еще большее смещение распределения взрывных нагрузок в сторону увеличения, что связано с более высокими избыточными давлениями при взрыве ГВС стехиометрического состава, увеличением в общем анализе доли крупных облаков ГВС и симбатным изменением частоты их воспламенения;

3) оценка по наихудшему случаю рассеяния облака ГВС, идентифицированному с помощью CFD-инструментов. В практических вычислениях для оценки размеров наибольшего по размеру облака ГВС, содержащей, как правило, до 35 % смеси стехиометрического состава, достаточно 5–10 CFD-симуляций [8]. При таком подходе следует ожидать больших избыточных давлений, чем при оценке взрыва с использованием установившегося рассеяния облака ГВС, но меньших, чем при оценке взрыва с использованием упрощенных методов расчета рассеяния облака ГВС;

4) оценка по теоретическому наихудшему случаю рассеяния облака ГВС. Этот подход

применялся в основном в начале 1990-х гг. до широкого применения CFD-инструментов анализа дисперсии облака ГВС. Отличается простотой и чрезвычайной консервативностью, что негативно сказывается на массогабаритных характеристиках проектируемых морских объектов. В настоящее время в практике проектирования не используется;

5) оценка по теоретическому наихудшему случаю рассеяния облака ГВС без детального представления геометрии окружающего пространства. Как отмечено выше, неучет деталей геометрии анализируемого объекта ведет к сильному занижению величины избыточного давления, что в определенной степени может компенсировать консерватизм метода. В настоящее время в практике проектирования морских платформ не используется;

6) оценка взрывных нагрузок по NFPA-68 «Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting». Метод применяется исключительно для открытых площадок береговых производственных объектов, так как не учитывает особенностей формирования облака ГВС и его взрыва в ограниченном и технологически загроможденном пространстве.

Результаты расчетов величин избыточного давления, возникающего на модельной морской платформе с частотой не выше  $10^{-4}$  1/год, т.е. проектной аварийной нагрузки, на которую должна быть рассчитана конструкция платформы, представлены в табл. 2 [8].

Согласно табл. 2, указанные методы оценки взрывных нагрузок дают принципиально разные значения. Применение некоторых из них в современной практике невозможно ввиду экономической нецелесообразности (связан-

Таблица 2

**Результаты расчетов величины избыточного давления по различным методам**

№	Метод анализа	Избыточное давление, бар
1	Полноценная вероятностная оценка взрыва, удовлетворяющая требованиям настоящей работы	0,45
2	Полноценная вероятностная оценка взрыва с использованием установившегося рассеяния облака ГВС	1,05
3	Вероятностная оценка взрыва с использованием упрощенных методов расчета рассеяния облака ГВС	8,2
4	Оценка по реалистичному наихудшему случаю рассеяния облака ГВС, идентифицированному с помощью CFD-инструментов	2,2
5	Оценка по теоретическому наихудшему случаю рассеяния облака ГВС	8,3
6	Оценка по теоретическому наихудшему случаю рассеяния облака ГВС без детального представления геометрии окружающего пространства	0,42
7	Оценка взрывных нагрузок по NFPA-68	0,048

ной с необходимостью усиления несущих конструкций морской платформы, повышением ее металлоемкости и, как следствие, стоимости), при этом совпадение результатов расчетов по первому и предпоследнему из них следует считать случайностью. Рассмотренный пример наглядно показывает важность применения адекватного методического аппарата для получения реалистичных оценок взрывных нагрузок, являющихся основой для проектирования базовых систем безопасности морских платформ.

Бурное развитие компьютерных технологий в последнее десятилетие и появление верифицированных программных продуктов по моделированию развития аварийных процессов на морских платформах сделало возможным повсеместное применение CFD-инструментов при проектировании подобных объектов, с каждым годом сокращая стоимость этих работ и повышая их точность и эффективность. Наличие формализованной

процедуры вероятностной оценки взрыва, совершенствующейся по мере развития соответствующей методологии, позволяет до определенного предела сократить влияние «ошибок» исполнителя на получаемый результат (человеческий фактор), что, безусловно, способствует дальнейшему распространению указанных технологий проектирования морских объектов. Активное развитие методов оценки степени деформации конструкций платформы под действием поражающих факторов аварий позволит в ближайшем будущем обоснованно прогнозировать частоты возникновения ущербов определенной тяжести при проектировании морских платформ, что также окажет заметное положительное влияние на надежность и безопасность проектируемых объектов. Эти, а также другие факторы делают применение упрощенных подходов вероятностной оценки взрыва при проектировании морских платформ нецелесообразным.

### Список литературы

1. Regulations relating to design and outfitting of facilities, etc. in the petroleum activities // The Facilities Regulations. – Norway.
2. Hjertager B.H. Explosion propagation of non-homogeneous methane-air clouds inside an obstructed 50 m<sup>3</sup> vented vessel / B.H. Hjertager, M. Bjørkhaug, K. Fuhre // J. Haz. Mater. – 1988. – № 19. – P. 139–153.
3. Hjertager B.H. Gas explosion experiments in 1:33 scale and 1:5 scale; offshore separator and compressor modules using stoichiometric homogeneous fuel–air clouds / B.H. Hjertager, M. Bjørkhaug, K. Fuhre // J. Loss. Prev. Process Ind. – 1988. – № 1. – P. 197–205.
4. van Wingerden C.J.M. Prediction of the strength of blast waves in the surroundings of vented offshore modules / C.J.M. van Wingerden, O.R. Hansen, R. Teigland // ERA-report 95-1173. – London, 1995.
5. Al-Hassan T. Gas explosions in large-scale offshore module geometries: Overpressures, mitigation and repeatability / T. Al-Hassan, D.M. Johnson // OMAE-98. – Lisbon, Portugal, 1998.
6. Johnson D.M. Investigation of Gas Dispersion and Explosions in Offshore Modules / D.M. Johnson, R.P. Cleaver, J.S. Puttock et. al // Offshore Technology Conference. – Houston, 2002. – P. 14134, TX.
7. NORSOK Z-013. Risk and emergency preparedness analysis. – 2001.
8. Bakke J.R. Probabilistic analysis of gas explosion loads / J.R. Bakke, O.R. Hansen // FABIG Newsletter. – 2003. – P. 34.
9. Hansen O.R. (2001). Explosion risk assessment: how the results vary with the approach chosen / O.R. Hansen, J. Renoult, J.R. Bakke // Fall Symposium Proceedings. – Mary Kay O' Connor Process Safety Centre, Dept. of Chemical Engineering, Texas A&M University, 2001. – TX 77843–3122. – P. 395–410.
10. DNV Technical report JIP Ignition Modelling: Time Dependent Ignition Probability Model // Report no. 96-3629. – Rev. 04. – Det Norske Veritas.
11. Huser A., Kvernfold O. Explosion risk analysis – Development of a general method for gas dispersion analyses on offshore platforms / A. Huser, O. Kvernfold // Proc. Parallel CFD. – Trondheim, 2000.