

The mathematical model of movement of upper-stage rocket round the center of mass with the toroidal tank filled with liquid fuel is offered. Time dependencies of movement parameters are determined by numerical and analytical methods. Limiting cases of orientation in Euler's angles are investigated.

Key words: upper-stage rocket, Cayley-Klein parameters, kinematic equations, Euler's angles.

УДК 629.563

А. П. Куляшов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

В. А. Шапкин, доктор технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

А. А. Кошурина, кандидат технических наук, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

М. С. Крашенинников, аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

УНИВЕРСАЛЬНОЕ СПАСАТЕЛЬНОЕ СРЕДСТВО С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ*

Приводятся результаты анализа наиболее значительных аварий на нефтяных и газовых платформах, расположенных на шельфовых месторождениях, которые произошли в мире за последние 46 лет. Делается вывод о необходимости создания специального спасательного средства для платформ, расположенных в шельфовой зоне северных морей. В качестве такого средства рассматривается универсальное спасательное средство с роторно-винтовым двигателем. Показан результат реализации первого этапа приведенной методики определения наиболее оптимальных размеров роторно-винтового движителя.

Ключевые слова: спасательное средство, роторно-винтовой движитель, шельфовые месторождения, моделирование.

История промышленного освоения нефтегазовых месторождений в шельфовой зоне берет свое начало в 1947 г., когда американская компания «Керр Макги» построила первую в мире нефтяную платформу в Мексиканском заливе в 16 км от берега на глубине 6 м и тогда же начала с нее бурение [1]. В настоящее время порядка 35 % добытой нефти и 32 % газа приходится на шельфовые месторождения [2].

В связи с тем что запасы нефти и газа на материковых месторождениях неуклонно уменьшаются, актуальным становится вопрос о добыче нефти и газа именно с шельфовых месторождений.

Работа на таких платформах сопряжена с большей по сравнению с наземными комплексами опасностью. Это связано не только с более суровыми условиями, в которых добываются полезные ископаемые, но также и с тем, что в случае аварии территория, подверженная негативному воздействию неконтролируемых выбросов углеводородов, во много раз превышает таковую у наземных комплексов. В обеспечении безопасности данных объектов наиболее важную роль играют технические и технологические инновации, а также современные нормы и правила, предписывающие порядок проведения операций и мероприятий на платформах.

Хорошим примером внедрения современной системы норм обеспечения безопасности, явилась система саморегулирования нефтегазовых компа-

ний, работающих на шельфе (целеориентированный режим обеспечения безопасности). Данная система применена в Норвегии, Голландии, Великобритании и ряде других стран. Помимо эффективности отличительной чертой проведенных реформ явилась тенденция сосредоточения усилий компаний не на тотальном снижении аварийности, а на снижении аварийности с тяжелыми и значительными последствиями. Переход крупных нефтегазовых компаний на саморегулирование позволил за 5 лет снизить количество аварий со значительными последствиями в 3 раза [3].

Однако остающаяся вероятность возникновения крупных аварий диктует необходимость в надежной эвакуации персонала платформ. Рассмотрение крупных аварий на нефтегазовых платформах позволит определить превалирующие факторы риска, на которые необходимо обратить особое внимание при проектировании спасательных средств.

В общей сложности в период с 1965 г. по 2011 г., т. е. за последние 46 лет, на нефтегазовых платформах произошло более 60 инцидентов, в результате которых погибли по меньшей мере 610 человек, а 93 человека получили тяжелые травмы (см. табл.).

Обзор самых крупных аварий на нефтегазовых платформах и учет характера их протекания позволяет выделить следующие факторы риска (источники опасности).

1. Отсутствие контроля за состоянием технологических систем и состоянием технологического процесса, а также за обстановкой в помещениях и отсеках платформы.

2. Отсутствие контроля за динамическими параметрами системы «платформа – якорные устройства – оборудование скважины».

3. Отсутствие систем аварийного управления, способных оказать воздействие на состояние технологических систем и платформы в целом в случае потери управления штатной системой управления.

4. Опасное и неконтролируемое маневрирование плавсредств в непосредственной близости от платформы.

5. Воздействие волновых и ветровых нагрузок, не учтенных при проектировании, приводящих к возникновению напряжений, превышающих допустимые значения.

6. Невозможность использования штатных спасательных средств в условиях чрезвычайных ситуаций.

7. Отсутствие судов аварийно-спасательных отрядов в зоне 15-минутной досягаемости до платформы. Как показывает статистика чрезвычайных ситуаций, именно такой интервал времени необходим для оказания экстренной помощи экипажу платформы.

Некоторые крупные аварии нефтегазовых платформ, расположенных на шельфе

Платформа	Владелец	Дата аварии	Место аварии	Расстояние до берега	Персонал платф.	Число погибших людей
Bohai-2		25.11.1979	Залив Бохай, между Китаем и Кореей		74	72
Alexander L. Kiel-land	Stavanger Drilling	27.03.1980	Месторождение Экофиск, Северное море		212	123
Ocean Ranger		15.02.1982	Северная Атлантика	267 км		84
Piper Alpha	Occidental Petroleum	07.1988	120 миль к северо-востоку от Абердина, Англия	193 миль		167
P-36	Petrobras	15.03.2001	125 км к востоку от побережья Бразилии	125 км		11
Adriatic IV		10.08.2004	Район Порт-Саида, Египет		150	
Платф. комплекса Mumbai High North		27.07.2005	Индия, побережье Мумбаи, возле города Махараштра	150 км		362 чел. пострадали и 22 погибли
Usumacinta		21.10.2007	Мексиканский залив		86	18
Statfjord A	StatoilHydro	24.03.2008	Шельф Северного моря	300 км		
	Mariner Energy	02.09.2010	Мексиканский залив	160 км	13	
	BP	20.04.2010	Мексиканский залив	84 км	126	17 чел. пострадали и 11 погибли

Среди основных угроз возникновения катастрофических последствий после аварий можно отметить следующие.

1. Нефтегазовые фонтаны и выбросы из скважин.

2. Внезапное разрушение оборудования и трубопроводов, а также несущих конструкций буровых установок и платформ.

3. Утечка углеводородов из исправного оборудования в сочетании с ошибочными действиями персонала.

4. Столкновение оборудования, трубопроводов, а также опорных конструкций платформ с посторонними объектами, например морскими судами или вертолетами.

Приведенные результаты анализа позволяют сделать вывод, что наряду с совершенствованием систем регулирования и организации труда особого внимания заслуживает вопрос обеспечения безопасности персонала платформ техническими средствами. И здесь речь идет об актуальной проблеме своевременной, быстрой и эффективной эвакуации персонала платформ в случае аварии.

Известно, что наиболее перспективными акваториями по возможности создания нефтегазодобы-

вающих комплексов являются арктические моря, на долю которых приходится более 85 % потенциальных ресурсов нефти и газа [4]. Основными районами концентрации углеводородных ресурсов являются Баренцево (3,8 млрд т), Карское (4,7 млрд т), Восточно-Сибирское (2,1 млрд т) и Охотское (2,1 млрд т) моря [4].

Характеристика условий расположения российских нефтегазодобывающих платформ может быть рассмотрена на примере Штокмановского месторождения (рис. 1) в Баренцевом море. Обобщение материалов различных организаций позволяет сформулировать следующие основные характеристики условий эксплуатации добывающей техники на Штокмановском месторождении: расстояние от материка 680 км; глубина до дна моря 320–350 м; продолжительность полярного дня в среднем составляет 102 дня в год; уменьшение видимости в открытом море вызывается туманами, выпадениями осадков, метелями и низкой облачностью, максимальная скорость ветра с порывами достигает 49 м/с; колебания уровня воды от среднего изменяются от +90 до –125 см, максимальные скорости течения могут составлять 0,9 м/с на поверхности

и 0,3 м/с на дне, максимальная высота волны 24 м; максимальная толщина льда 1,2 м. При эксплуатации буровой техники айсберги, представляющие опасность, необходимо взрывать или отбуксировывать, чтобы избежать столкновения их с буровыми установками.

Внешние условия эксплуатации добывающих комплексов (рис. 2) определяют предъявляемые к ним требования, выполнение которых способствует оптимальности проектирования; обеспечению необходимых мореходных и маневренных качеств; соответствию требованиям прочности, технической и экологической безопасности; высоким технико-экономическим показателям при эксплуатации; снижению стоимости обустройства месторождения.

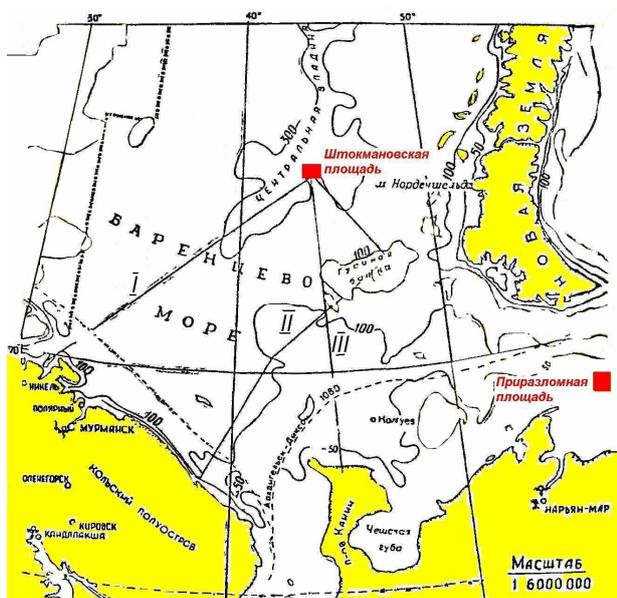


Рис. 1. Схема расположения Штокмановского и Приразломного месторождений



Рис. 2. Нефтегазодобывающая платформа в условиях ледяного покрова

Как видно из приведенной характеристики условий Штокмановского месторождения, отличительной особенностью российского арктического шельфа является наличие ледяного покрова.

Поэтому широко распространенные в мире на нефтегазодобывающих платформах незамерзающих

морей спасательные средства не удовлетворяют российским условиям.

Применение воздушных средств эвакуации на нефтегазодобывающих платформах шельфовой зоны арктических районов будет ограничено из-за наличия мощного и порывистого ветра, а также возникновения мощных воздушных потоков, поднимающихся вверх от пятен горячей нефти, которые могут возникнуть в случае аварии.

Применение спасательных плотов (рис. 3), использующихся вместе со специальной системой спуска (рис. 4), также будет неэффективно вследствие невозможности данных плотов двигаться в условиях арктических морей и обеспечивать необходимый уровень безопасности.



Рис. 3. Пример надувного спасательного плота для эвакуации людей



Рис. 4. Средство транспортировки людей с платформы на спасательные плоты

Следовательно, возникает необходимость разработки спасательных средств, адаптированных к условиям северных морей.

На основании обзора условий расположения российских нефтегазодобывающих платформ сформулированы требования к спасательным средствам для эвакуации их персонала. В целом спасательные средства для арктических районов должны:

- 1) обладать особенно высокой проходимостью и амфибийными качествами, преодолевать водные, снежные и ледовые преграды;
- 2) обеспечивать движение в условиях порывистого ветра и шторма;

3) иметь большой запас плавучести и устойчивости;

4) преодолевать пятна горячей нефти, расплывшиеся на воде или на льду;

5) определять окружающую обстановку в условиях плохой видимости;

6) поддерживать режим автономной работы до нескольких суток.

В данной ситуации необходимо рассмотреть возможность применения транспортных средств, двигатели которых обладают отличительным характером взаимодействия с опорным основанием. Среди плавающих машин особое место занимают машины с роторно-винтовым двигателем (РВД). Особенности этого двигателя позволяют применять транспортно-технологические средства, оснащенные им, в разных условиях эксплуатации, где применение других типов двигателей невозможно или нерационально. РВД позволит обеспечить движение по замерзающим водоемам круглый год и проводить эвакуацию людей в случае аварий в арктических зонах (рис. 5).



Рис. 5. Демонстрация выхода на лед роторно-винтовой машины ГПИ-72

Отличительная особенность РВД состоит в том, что, сочетая в себе качества гидравлического и сухопутного двигателей, он может с достаточной эффективностью работать на сильно переувлажненных грунтах, снегу, льду, воде и среде, являющейся комбинацией перечисленных сред. Используют РВД на машинах различного назначения – дорожно-строительных, сельскохозяйственных, военных и т. д. Так, например, в России РВД применяется на тяжелых и мощных ледорезных машинах и на легких снегоболотоходах. В США – на военных бронетранспортерах для передвижения по болотам и залитым водой полям. В Польше поставили РВД на специальный тягач, передвигающийся по толстому слою ила и предназначенный для обслуживания рыбных хозяйств после спуска из них воды. В Японии изготавливают спасательные и прогулочные транспортные средства с РВД.

В частности японской компанией Mitsui построены несколько роторно-винтовых машин (РВМ), одна из которых предназначена специально для движения в арктических льдах у побережья Аляски. Согласно данным этой компании при испытаниях модели РВМ

на льду толщиной 30...50 см без снега наивысшее максимальное тяговое отношение (отношение силы тяги к весу) было равно 45 % при угле наклона винтовой лопасти 30 градусов и при отношении высоты лопасти к диаметру базового цилиндра 0,15. Построив и испытав в реальных условиях эксплуатации РВМ массой 10,8 т и длиной 7 м, инженеры компании Mitsui приводят следующие результаты: машина может буксировать грузы порядка 200 т по воде со скоростью 3 узла, на льду – со скоростью 25...40 узлов; может двигаться в условиях льда, покрытого водой на 50 см, где любые другие машины и суда двигаться не могут; РВМ ломает лед толщиной до 43 см.

По сравнению с другими типами наземных двигателей РВД обладает целым рядом преимуществ, например [5]:

1) обеспечивает особенно высокую проходимость транспортного средства;

2) создает очень малые давления на опорное основание ($0,04-0,1 \text{ кг/см}^2$), на порядок меньшие по сравнению с гусеничными и колесными типами двигателей;

3) позволяет развить большую силу тяги при прочих равных условиях, чем любые другие типы наземных двигателей.

Опыт использования РВД на амфибийных транспортно-технологических и ледово-фрезерных машинах указывает на перспективность разработки автономного универсального по способности двигаться в перечисленных средах спасательного средства для оказания помощи терпящим бедствие экипажам судов и персоналу ледостойких стационарных платформ.

Создание принципиально нового по предъявляемым к нему требованиям и выполняемым задачам транспортно-технологического средства для движения в сложных условиях эксплуатации (слабонесущие основания, снег, лед, вода и комбинация этих сред) невозможно без исследований в соответствующих областях.

На рис. 6 и 7 показан разработанный в ИГТУ проект универсального спасательного средства (УСС) с роторно-винтовым двигателем и условия его эксплуатации.

После предварительной проработки вопросов условий эксплуатации и конструктивных особенностей существующих спасательных средств для эвакуации персонала нефтегазодобывающих платформ на шельфе арктических морей сформулирована основная концепция универсального спасательного средства.

Разработанное спасательное средство представляет собой роторно-винтовую плавающую машину со следующими параметрами.

- Габаритные размеры: длина 9,5 м, ширина 4,6 м, высота 3,06 м.

- Осадка полностью укомплектованного спасательного средства с экипажем и эвакуируемым персоналом 0,92 м.

- Полная масса 7,5 т.

- Вместимость 38 человек – 36 эвакуируемых и два человека экипажа.

- Скорость на льду – до 35 км/ч, снегу – до 40 км/ч и на воде – до 5 км/ч.
- Диаметр базового цилиндра движителя 1,2 м.
- Длина роторно-винтового движителя 6,65 м.
- Высота винтовой лопасти 0,2 м.
- Клиренс 0,54 м.

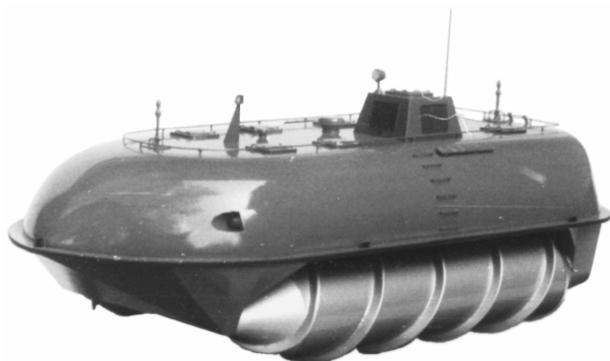


Рис. 6. Модель универсального спасательного средства с роторно-винтовым движителем



Рис. 7. Иллюстрация условий эксплуатации универсального спасательного средства с роторно-винтовым движителем

Способность двигаться по пятну горячей нефти обеспечивается наружной изоляцией корпуса жаропрочными плитками, применяемыми на корпусах космических кораблей многоразового использования. Определение окружающей обстановки обеспечивается применением систем технического зрения. Автономность работы в течение нескольких суток достигается за счет применения систем жизнеобеспечения.

С учетом современного уровня развития техники, а также того что разработанный проект УСС был выполнен более 20 лет назад, его результат нельзя считать наилучшим возможным техническим решением. Процесс создания новой, более совершенной модели универсального спасательного средства с роторно-винтовым движителем будет включать в себя следующие этапы.

1. Математическое моделирование процесса взаимодействия РВД с различными типами опорных оснований.

2. Проведение ряда экспериментов с различными типами и исполнениями РВД и корректировка модели на основе полученных данных.

3. Создание модели движения РВМ в различных средах с различными изменяемыми параметрами.

4. Изготовление опытных образцов РВМ и проверка с их помощью достоверности получаемых из модели движения данных.

5. Определение с помощью адекватной модели движения РВМ оптимальных параметров машины и геометрических размеров движителя в зависимости от введенных в модель критериев отбора, например отбор по наибольшей производительности и др.

6. Разработка на основе полученных рекомендаций конструкторской документации на опытный образец.

7. Разработка и изготовление универсального спасательного средства с роторно-винтовым движителем после ряда соответствующих мероприятий по анализу данных, полученных от испытаний опытного образца.

Как видно из общей последовательности этапов проектирования УСС с РВД, вначале создается математическая модель различных процессов, а затем происходит ее корректировка. Это помогает, с одной стороны, развивать и проверять на практике теорию движения РВМ, а с другой – получать с помощью этой теории ценные сведения и рекомендации, необходимые для проектирования современных транспортно-технологических машин особого назначения.

Полученная в ходе реализации проекта математическая модель движения РВМ будет представлять собой довольно известную систему «местность – машина» [6], которая в общем виде является объединением следующих моделей:

- 1) модель роторно-винтового движителя;
- 2) модель различных сред движения, а также модель их различных комбинаций;
- 3) модель, описывающая характеристики и поведение самой машины.

Для создания модели ротора, а именно уравнений, описывающих его поверхность, целесообразно условно разбить его на следующие примитивы: поверхность базового цилиндра; поверхности, образующие винтовые лопасти; поверхности наконечников ротора, которые в общем виде состоят из двух частей – с винтовой лопастью и без нее; поверхности торцов ротора; поверхность перехода между базовыми цилиндрами в случае описания поверхности двухцилиндрового РВД (см. рис. 5). Данное разбиение не учитывает плавных переходов от одной поверхности к другой, однако позволяет получить описание поверхности очень близкой к настоящей поверхности ротора.

Помимо разделения на одно- и двухцилиндровые РВД данный движитель может иметь различные формы наконечников (конусные, сферические, параболической формы, а также их комбинации), формы сечения винтовых лопастей (треугольные, трапециевидальные и листовые), иметь на наконечниках винтовые лопасти, а также являться многозаходным (до 3-4 навивок винтовых лопастей).

В общем виде модель РВД, например одноцилиндрового (рис. 8), а точнее, его поверхность, представляет собой обобщение уравнения геликоида. За-

дается данная поверхность совокупностью систем параметрических уравнений (для декартовой системы координат) следующего вида:

$$\begin{cases} X = f(r) \cdot \cos[f(P)], \\ Y = f(r) \cdot \sin[f(P)], \\ Z = f(h) \frac{f(P)}{2\pi}. \end{cases} \quad (1)$$

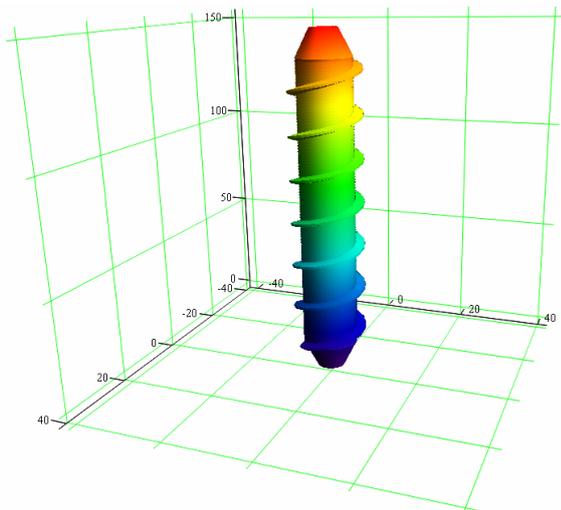


Рис. 8. Результат построения поверхности одноцилиндрового РВД на основе приведенных параметрических уравнений

В системе уравнений (1): $f(r)$ – функция изменения радиуса, определяет удаленность от оси ротора, в данном случае от оси Z , и позволяет задавать пределы его возможных изменений, где r – заданный диапазон изменений радиуса;

$f(h)$ – функция изменения высоты строящейся фигуры, где h – задаваемый диапазон изменений высоты;

$f(P)$ – функция, определяющая пределы изменения границ фигуры и их положение в сечениях плоскостями параллельными XOY , конкретное значение функции определяется через j ;

i, j – параметры уравнения, не показанные в зависимостях общего вида.

В частности система параметрических уравнений, которая описывает поверхность одной из сторон винтовой лопасти, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} X = (r + hi) \cdot \cos\left(\frac{L_6}{P} 2\pi j - \frac{t_o - t_b}{P} \pi i\right), \\ Y = (r + hi) \cdot \sin\left(\frac{L_6}{P} 2\pi j - \frac{t_o - t_b}{P} \pi i\right), \\ Z = L_n + L_6 j. \end{cases} \quad (2)$$

В системе уравнений (2): r – радиус базового цилиндра; h – высота винтовой лопасти; L_6 – длина базового цилиндра ротора; P – шаг винтовой лопасти; t_o – толщина винтовой лопасти у основания; t_b – толщина винтовой лопасти при вершине; L_n – длина наконечника.

На данный момент создана математическая модель описания формы роторно-винтового движителя, которая позволяет варьировать любой требуемый параметр, например, длину и диаметр базового цилиндра, форму и размеры профиля винтовой линии, а также угол ее навивки и многие другие. В дальнейшем предстоит определиться с выбором моделей описания различных сред движения и произвести их объединение с моделью РВД для описания процессов, происходящих в зоне контакта движителя с опорным основанием.

Реализация проекта по вышеперечисленной последовательности этапов позволит создать универсальное спасательное средство с роторно-винтовым движителем, отвечающее современным требованиям обеспечения безопасности.

Библиографические ссылки

1. Вокруг Света. – URL: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/2938/>
2. *Осадчий А.* Нефть и газ российского шельфа: оценки и прогнозы // Наука и жизнь. – 2006. – № 7.
3. *Мокроусов С. Н.* Проблемы обеспечения безопасности при освоении нефтегазовых ресурсов на континентальном шельфе и на суше Российской Федерации // Транспортная безопасность и технологии. – 2006. – № 1.
4. *Богатырева Е. В.* Методы обеспечения безопасности персонала нефтегазовых платформ арктического шельфа : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004.
5. Роторно-винтовые машины. Основы теории движения / А. П. Куляшов [и др.]. – Нижний Новгород : НГТУ, 2000. – 451 с.
6. *Беккер М. Г.* Введение в теорию систем «местность – машина» : пер. с англ. / под ред. В. В. Гуськова. – М. : Машиностроение, 1973. – 520 с.

A. P. Kulyashov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University After R. Ye. Alekseev
V. A. Shapkin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University After R. Ye. Alekseev
A. A. Koshurina, Candidate of Science, Nizhny Novgorod State Technical University After R. Ye. Alekseev
M. S. Krasheninnikov, Postgraduate Student, Nizhny Novgorod State Technical University After R. Ye. Alekseev

Universal Life-Saver with a Rotor and Screw Mover

The paper presents an analysis of the most significant failures in the oil and gas platforms located in the offshore fields that have been occurred worldwide over the last 46 years. The conclusion about necessity of the special rescue equipment for platforms located offshore in the northern seas is made. As a variant of such equipment a universal life saver with a rotor and screw mover is considered. The first phase results of determining of the mover optimal sizes are shown.

Key words: rescue equipment, rotor and screw mover, offshore deposits, simulation.