

## УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ПРИ ОСВОЕНИИ РЕСУРСОВ ШЕЛЬФА

С.В. Федоров

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: s.fedorov.mhi@gmail.com

*Приводится анализ причин и факторов возникновения аварийных ситуаций на средствах освоения шельфа, на основании которого строится модель рисков. Для минимизации рисков предлагается информационная система мониторинга технического состояния средств освоения шельфа. Оценивается эффект от использования этой информационной системы.*

**Введение.** Добыча углеводородного сырья в морских условиях гораздо сложнее добычи на континенте. Многочисленные угрозы безопасности промышленных сооружений сложнее поддаются оценкам и управлению. Как следствие - высокая аварийность на всех объектах морского нефтегазового комплекса, сопровождающаяся гибелью людей, серьезными последствиями для окружающей среды и финансовыми потерями. Высокие темпы развития отрасли, необходимость освоения глубоководных районов континентального шельфа и шельфа замерзающих морей вызывают серьезные опасения в возможностях обеспечения безопасности добывающей деятельности для человека и окружающей среды. В связи с этим требуется разработка новых и совершенствования существующих подходов по регулированию безопасности промысловых работ в морских условиях.

**Анализ рисков.** Под риском принято понимать вероятность возникновения аварийной ситуации, повлекшей различные виды ущерба (финансовый, экологический, индивидуальный). Количественно величина риска определяется, как произведение вероятности определенного вида аварии  $P$  на величину последствий (ущерб)  $V$ :

$$R = P \cdot V.$$

Суммарный (интегральный) риск для отдельного технического объекта освоения шельфа (буровой платформы, подводного трубопровода, терминала и т.п.), а также для всего комплекса технических средств, вовлеченных в разведочные, промысловые и транспортные процессы определяется, как сумма всех рисков:

$$R_{\Sigma} = \sum P_i \cdot V_i.$$

Вероятность конечного события (причины аварии)  $P_i$  определяется произведением вероятностей промежуточных событий (факторов).

$$P_i = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_{n-1} \cdot P_n.$$

По каждому аварийному событию принято составлять дерево отказов (дерево событий), изображающее причинно-следственную связь между конечным числом факторов и причиной возникновения аварийной ситуации. Таким образом, дерево отказов представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения. Основными преимуществами данного метода анализа рисков являются наглядное представление ненадежных элементов объекта исследования и возможность анализа сложных объектов. Недостатками же являются значительные затраты средств и времени на составление деревьев отказа, необходимость вовлечения специалистов с глубоким пониманием проблемы отдельно для каждого случая отказа, а также наличие большой и надежной базы статистических данных об отказах или аварийности исследуемых объектов.

Современной тенденцией в управлении рисками является использование принципа ALARP (as low as reasonably practicable – настолько низко, насколько разумно осуществимо). Использование этого подхода позволило добиться снижения количества аварий со значительными последствиями в 5 раз за последние 5 лет на шельфе Северного моря [1].

Структура управления безопасностью средств освоения шельфа при та-

ком подходе выглядит следующим образом (рис. 1) [2]. На первой стадии проводится анализ по определению основных источников опасности, аварийных событий, которые могут быть вызваны этими источниками опасности, частоты (вероятности) их возникновения, и последствий возникновения аварийных ситуаций. На стадии количественной оценки риска рассчитывается суммарный риск от всех источников опасности. В качестве критерия для управления безопасностью принимается, так называемый, индиви-

дуальный риск, т.е. вероятность летального случая в год (или несчастных случаев). Этот критерий имеет два пороговых значения: нижнее  $10^{-4}$  и верхнее  $10^{-3}$ .

Далее, на третьей стадии регулирования рисков выполняется анализ по принципу ALARP (настолько низко, насколько разумно практически). Нижний порог критерия индивидуального риска определяет область приемлемого риска.

При рисках ниже этого значения не требуется проводить никаких мер по улучшению безопасности.



Р и с. 1. Схема управления безопасностью средств освоения шельфа

Напротив, риски, расположенные выше верхнего порога критерия индивидуального риска, считаются неудовлетворительными и требуют принятия любых мер по их снижению, не зависимо от величины затрат на понижающие риск меры. Между этими двумя пороговыми значениями лежит область ALARP или зона терпимости. В ней риски обязательно должны быть уменьшены, если затраты усилий и денег ниже или пропорциональны получаемому эффекту. Иными словами должен быть понижен настолько, насколько разумно практически. На следующей стадии определяются конкретные меры по контролю за безопасностью и смягчению последствий аварий, определение стоимости этих мер и выработка рекомендаций.

Чтобы учесть все нюансы разработки морских месторождений, приходится разрабатывать крайне сложные модели риска, привлекая к анализу специалистов разных профилей. Включение в модели риска множества факторов делает их трудными или невозможными для анализа. Поэтому для эффективности управления рисками принято включать в такие модели только те угрозы, которые могут повлечь за собой тяжелые последствия. К таким последствиям относят:

- нефтегазовые фонтаны и выбросы на скважинах;
- взрывы и пожары;
- столкновение морских судов и вертолетов с опорными конструкциями платформ и другими объектами;
- утечки нефти;

- ошибки при всех видах подъеморазгрузочных операций;
- разрушение несущих конструкций буровых установок и платформ от воздействия внешних воздействий (потеря устойчивости, потеря плавучести, наклонение, опрокидывание).

Последствия от этих видов угроз классифицируются как:

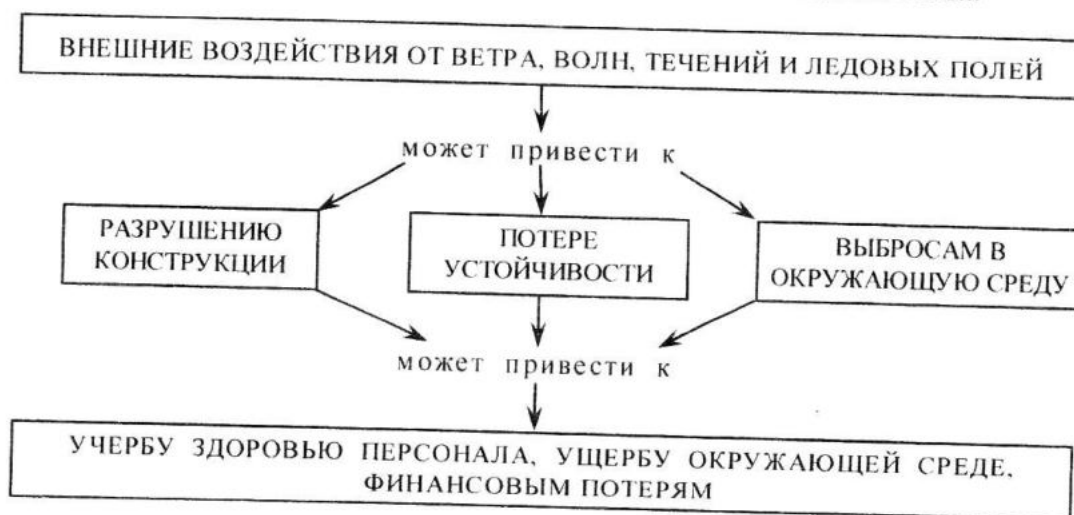
- ущерб здоровью и безопасности персонала;
- ущерб окружающей среде;
- коммерческий ущерб;
- комбинации нескольких последствий.

Частота возникновения аварийных ситуаций вследствие внешних воздействий от ветра, волн, течений и ледовых полей на конструкции буровых установок и платформ составляют по разным оценкам 25 – 40 % от общего числа аварий.

При этом последствия аварий существенно тяжелее на стационарных средствах освоения шельфа.

Чтобы определить необходимые меры для снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций вследствие воздействия на стационарные средства освоения шельфа и предложить способы их реализации, проведем анализ соответствующих рисков. При этом ограничимся только анализом вероятностей возникновения аварий  $P_i$ , как показателя эффективности управления рисками.

На рис. 2 приведена схема модели возникновения аварийных ситуаций от действия внешних воздействий на опорные основания стационарных буровых установок и платформ. В качестве начального события в модели рассматриваются внешние воздействия от ветра, волн, течений и ледовых полей.



Р и с. 2. Модель риска возникновения аварийных ситуаций от внешних воздействий на средства освоения шельфа

В качестве конечного события рассматриваются разрушение элемента конструкции или ее значительной части, потеря устойчивости стационарных средств освоения шельфа и разлив загрязняющих веществ (разлив нефти, выброс вредных газов), которые, в свою очередь, могут привести к последствиям различной степени тяжести для рабочего персонала, окружающей среды и финансовым потерям. Для определения сценариев возникновения этих опасных состояний построим деревья отказов (см. рис. 3 – 5).

Разрушение конструкции (рис. 3) может произойти при возникновении одного из следующих явлений: пластических деформаций, усталостных напряжений, динамических нагрузок и уменьшения толщины главных конструктивных элементов. На возможность появления опасного состояния, связанного с развитием пластических деформаций и последующего разрушения конструкции, оказывают влияние внешние нагрузки от действия ветра, волн, течений и льда. Появление такого события возможно в случае, когда реальные

внешние нагрузки в период эксплуатации на главные элементы конструкции превысят величины, соответствующие неблагоприятному сочетанию экстремальных нагрузок, принятых на проектной стадии, или в случае неправильного определения экстремальных нагрузок и их наихудшей комбинации. Контроль напряженного состояния элементов конструкции может быть осуществлен путем мониторинга внешних нагрузок. Это позволит рассчитывать комбинации внешних нагрузок, действующих при эксплуатации, и сопоставлять их с допустимыми значениями, указанными в инструкции по эксплуатации. На основании этих оценок лицо принимающее решение (ЛПР) способно проводить контроль напряженного состояния элементов конструкции и давать рекомендации по проведению планового и непланового технического осмотра.

На возможность появления опасного состояния, связанного с появлением усталостных напряжений, трещин в сварных элементах ферменных опорных основаниях и последующего разрушения конструкции, оказывают влияние число циклов знакопеременной нагрузки и пиковый размах напряжений от этих нагрузок. Появление такого события возможно в случае, когда максимальные пиковые напряжения и/или число циклов нагружения превышают значения принятые на проектной стадии.

Как и в случае с контролем пластических деформаций, мониторинг внешних нагрузок позволяет рассчитывать значения размахов напряжений и циклов нагрузки. На основании этого ЛПР имеет возможность проводить оценку усталостной прочности элементов конструкции и давать рекомендации по проведению технического осмотра.



Р и с. 3. Дерево отказов для случая разрушения конструкции

Внешние нагрузки от волн, ветра, течений и землетрясений могут служить источниками возбуждения динамических нагрузок. Риск появления резонанса глобальных или локальных мод колебаний средств освоения шельфа с энергетически мощными динамическими нагрузками, а также риск подвижек земной коры вследствие землетрясений подвергается тщательной оценке на проектной стадии.

Уменьшение толщины главных конструктивных элементов способно оказывать как прямое воздействие на надежность конструкции, так и влиять на увеличение пластических и усталостных

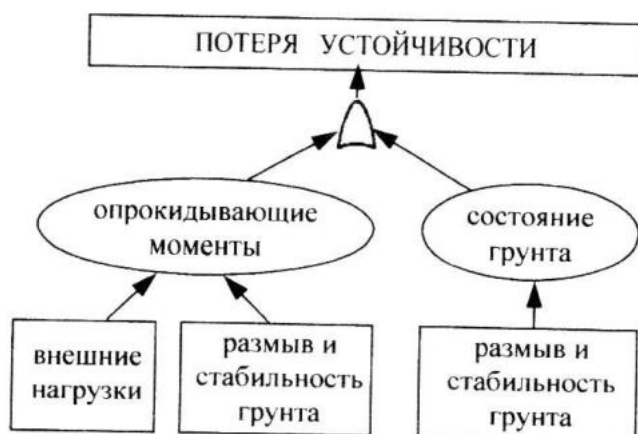
деформаций. Вероятность этого события крайне высокая, поэтому обеспечение безопасности и снижение рисков разрушения элементов конструкции за счет сильной коррозии обеспечивается техническим мониторингом, проведением плановых и неплановых осмотров элементов в зонах переменной ватерлинии и подводной части.

На возможность потери устойчивости средств освоения шельфа оказывают влияние опрокидывающие моменты от внешних воздействий (рис. 4). Появление такого события возможно в случае, когда опрокидывающие моменты от внешних нагрузок в период эксплуата-

ции превысят величины, принятые на проектной стадии. В свою очередь, вероятность такого превышения является достаточно высокой в случае неправильного определения опрокидывающих моментов или изменении состояния дна. Под последним понимается изменение поведения грунта и его взаимодействия с опорным основанием буровых установок под действием внешних нагрузок. Внешние нагрузки от действия течений способны вызвать изменение состояние дна, например, снизить его прочность при сдвиге, снизить его стабильность,

размывать опорные основания. В результате подобного воздействия средства освоения шельфа могут совершать горизонтальные смещения, что представляет опасность заклинивания бурового оборудования и выброса добываемых ресурсов в окружающую среду. Кроме этого увеличиваются опрокидывающие моменты, способные переместить или опрокинуть буровую установку.

Такое изменение дна, как деформация (образование зон размыва и аккумуляции грунта), существенно влияют на устойчивость стационарных установок.



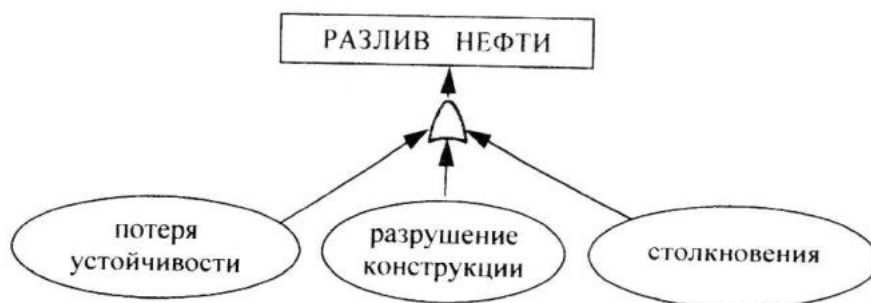
Р и с. 4. Дерево отказов для случая потери устойчивости

Однако прогнозирование этого явления на проектной стадии представляется крайне затруднительным из-за сложности проходящих процессов и неоднозначности в расчетных методах. Поэтому уменьшение риска возникновения этого события зависит от правильности решения о мерах по укреплению дна на проектной стадии и мониторинга деформаций дна в течение всего срока службы гидротехнического сооружения.

Вероятность выброса добываемых ресурсов в окружающую среду весьма велика, и может происходить не только в

аварийных ситуациях, но и при нормальном эксплуатационном режиме. Поэтому предупреждению этого явления и выработки мер ликвидации выбросов уделяется большое значение при освоении ресурсов шельфа. На вероятность этого события оказывают влияние две группы явлений: техногенные и внешние воздействия (рис. 5). К техногенным явлениям относят:

1) столкновения в море в связи с плохой видимостью и интенсивностью движения в районе добычи;



Р и с. 5. Дерево отказов для случая разлива нефти

2) выбросы продуктов добычи во время добычи, перегрузки, транспортировки, сброса технической воды в море;

3) хозяйственная и террористическая деятельность.

Внешние явления, способные вызвать появление опасных ситуаций, сопровождающиеся выбросом продуктов добычи, включают аварийные последствия от разрушения элементов конструкции и потери устойчивости средств освоения шельфа.

**Управление рисками.** Как видно из проведенного анализа, снижение рисков аварий с тяжелыми последствиями на протяжении всего операционного режима возможно за счет создания информационной системы обеспечения мониторинга за техническим состоянием средств освоения шельфа. В [3] автором предложена такая информационная система.

Для обеспечения мониторинга в ней используется аппарат численного моделирования основных рисков безопасности (волновые поля, гидродинамические и ледовые нагрузки, карты деформаций дна). В качестве исходных данных для моделирования различных расчетных ситуаций в предложенной информационной системе используются многолетние массивы данных о состоянии морской поверхностью, полученные в результате прямых и дистанционных измерений, а также проведения реанализа.

Оценим эффективность управления рисками на основе этой информационной системы. При этом под эффективностью будем понимать снижение рисков, которое можно добиться за счет использования информационной системы. Для этого на основе деревьев отказов проведем вероятностный анализ безопасности средств освоения шельфа без использования разработанной информационной системы и с ее использованием. Для оценки вероятности исходных событий деревьев отказа использовался банк данных о возникновении аварийных ситуаций на технических объектах шельфа WOAD (*Worldwide Offshore Accident Databank*), разработанный регистром DNV, отчеты по аварийности на шельфе Северного моря [4, 5], а также статистиче-

ские данные об аварийности на шельфе морей Российской Федерации [6 – 8].

Согласно этим статистическим данным порядка 35 % аварий связано с воздействием внешних условий. Аварийные ситуации в этих случаях могут привести к серьезным финансовым потерям и человеческим жертвам. За 1980 – 2005 гг. по данным [5] только на плавучих буровых установках различного назначения было зафиксировано свыше 3000 аварийных ситуаций в год на шельфе Северного моря, что составляет около 4,8 случаев в год на одной установке. Большая часть этих аварий приходится на операционный режим и связана с непосредственным проведением разведочных, буровых или транспортных работ. Частота возникновения аварий из-за разрушения конструкций составляет 0,04 случая в год, а потеря мореходных свойств (опрокидывание, потеря устойчивости, смещение с точки бурения) – 0,03 случая в год на одну установку. Несмотря на то, что частота возникновения аварийных ситуаций из-за внешних воздействий намного меньше ситуаций, возникающих в операционном режиме, последствия могут привести к частичной или полной потере установке и большому числу человеческих жертв.

Оценка рисков производилась на основе соотношений теории надежности [9]. Согласно этой работе для функции надежности вида  $P(t) = \exp(-\lambda t)$  вероятность возникновения  $m$  аварий за время  $\tau$  соответствует дискретному распределению Пуассона следующего вида:

$$P(m, \lambda \tau) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} \exp(-\lambda \tau),$$
$$m = 0, 1, 2, \dots, \lambda \tau,$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Вероятности исходных событий рассчитаны для случая возникновения одной аварии за 25 лет. Значения этих вероятностей приведены в табл. 1.

Вероятность возникновения аварии за счет разрушения конструкции (рис. 3) в течение 25 лет будет равна:

$$Q_1(25) = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \cup P_4 =$$
$$= 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4) = 0,551.$$

Вероятности исходных событий деревьев отказа

Наименование события	Интенсивность события (раз/год)	Вероятность события $P_i$
1. Превышение расчетных волновых нагрузок	0,007	0,1469
2. Превышение пикового размаха и количества циклов нагружения	0,01	0,1947
3. Превышение расчетных сейсмических нагрузок	0,00016	0,004
4. Развитие коррозии	0,027	0,3437
5. Размыв опорного основания	0,0055	0,3173
6. Столкновения из-за плохой видимости	0,012	0,2222

Аналогичным образом рассчитаем вероятность возникновения аварии в случае потери устойчивости буровой установки (рис. 4):

$$Q_2(25) = (P_1 \cup P_5) \cup P_5 = \\ = 1 - (1 - P(P_1 \cup P_5))(1 - P_5) = 0,602.$$

Вероятность возникновения выброса загрязняющих веществ из-за поломки буровых установок:

$$Q_3(25) = Q_1 \cup Q_2 \cup P_6 = \\ = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_6) = 0,861.$$

Как видно из проведенных расчетов вероятности возникновения аварийных ситуаций, угрожающих жизни людей и всего гидротехнического сооружения из-за воздействия внешних условий, достаточно велики. Уменьшение рисков возникновения этих ситуаций на проектной стадии затруднено несовершенством существующих методов расчетов, а также сложностью прогнозирования их развития. В этом случае для предупреждения развития этих ситуаций приходится осуществлять мониторинг технического состояния гидротехнических сооружений на протяжении всего срока службы.

Своевременное обнаружения опасного состояния и принятие мер по его ликвидации снижает возможность их возникновения от двух до десяти раз. Учитывая этот факт, оценим эффект от использования информационной системы [3]. Результаты расчета эффективности приведены на рис. 6 – 8. Верхняя граница показывает начальный уровень риска, а заштрихованная – величину эффекта, которую предполагается получить при ведении оперативного мониторинга.



Рис. 6. Снижение вероятности разрушения конструкции за счет использования ИС мониторинга

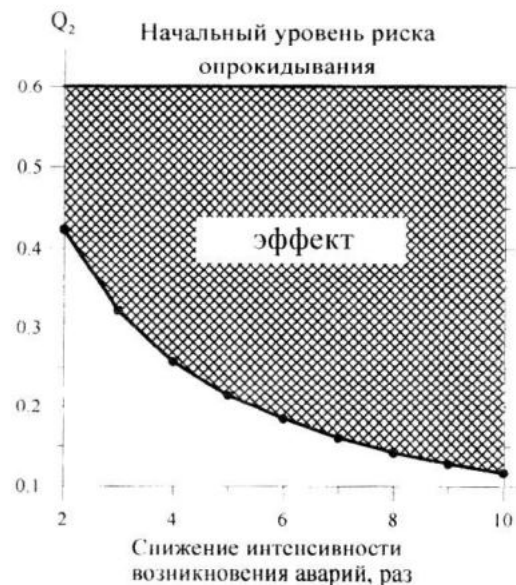


Рис. 7. Снижение вероятности опрокидывания буровых установок за счет использования ИС мониторинга

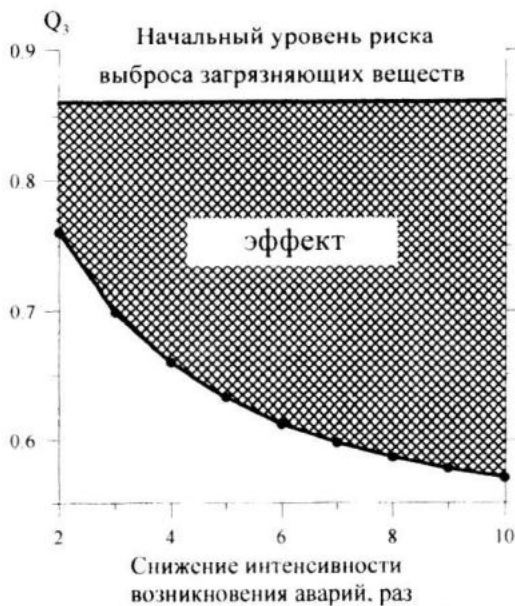


Рис. 8. Снижение вероятности выброса загрязняющих веществ за счет использования ИС мониторинга

**Заключение.** Как видно из рис. 6 – 8 за счет использования информационной системы для мониторинга технического состояния средств освоения шельфа [3] вероятность возникновения аварийных ситуаций, связанных с разрушением конструктивных элементов из-за внешних воздействий, снижается на 15,6 – 32,3 % при уменьшении интенсивности таких ситуаций от двух до десяти раз. Снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций, возникающих по причине опрокидывания (или накренения) установок и вследствие выбросов загрязняющих веществ, составляет 29,3 – 80,5 % и 11,6 – 33,8 % соответственно при уменьшении интенсивности таких ситуаций от двух до десяти раз. Таким образом, можно отметить, что за счет своевременного обнаружения опасных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации средств освоения шельфа в результате действия на них внешних воздействий от ветра, волн и течений, уменьшается вероятность возникновения таких аварийных ситуаций, как разрушение конструкции, опрокидывание установки и выброс загрязняющих веществ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [www.hse.gov.uk/statistics/overpic.htm](http://www.hse.gov.uk/statistics/overpic.htm).

2. *Risk implications in site characterization and analysis for offshore engineering and design.* – Research report 286. – WS Atkins Consultants Ltd for the Health and Safety Executive, 2004. – 116 p.
3. Федоров С.В. Геоинформационная система для обеспечения мониторинга средств освоения шельфа // Вестник СевГТУ: Сб. научн. тр. – 2010. – 106. – С. 184 – 187.
4. *Accident statistics for fixed offshore units on the UK Continental Shelf 1980 – 2005.* Det Norske Veritas / UK Health & Safety Executive. – 2007. – Report No. RR566. – 59 p.
5. *Accident statistics for floating offshore units on the UK Continental Shelf 1980 – 2005.* Det Norske Veritas / UK Health & Safety Executive. – 2007. – Report No. RR567. – 89 p.
6. Алексеев С.П., Добротворский А.Н., Яценко С.В. и др. О комплексной системе обеспечения безопасности освоения морских нефтегазовых месторождений Сахалина // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана: сб. науч. тр. – СПб., 2005. – Вып. 1. – С. 21 – 38.
7. Алексеев С.П., Бродский П.В., Добротворский А.Н. и др. Комплексная система безопасности освоения ресурсов континентального шельфа: стратегия развития // IV Российская научно-техническая конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» НО-2007, Санкт-Петербург, 23-25 мая 2007: тр. конференции. – СПб., 2007. – Вып. 1. – С. 517 – 522.
8. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. – М.: Изд-во «ВНИРО», 2001. – 247 с.
9. Драпишников Л.В., Завгородний В.В. Анализ и оценка риска возникновения техногенных аварий с целью управления их безопасностью на основе информационных технологий // Новые технологии. – Кременчуг: Кременчужский университет економіки, інформаційних технологій і управління, 2008. – №4. – С. 119 – 126.