

УДК 629.58 + 004.942

ОЦЕНКА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИИ АНПА ПУТЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз (Санкт-Петербург)

Введение

Современное развитие автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к возможности создания АНПА большой автономности с дальностью хода 10000 км. В связи с этим при формировании маршрутного задания (МЗ) перед планировщиком остро стоит задача прогнозирования необходимого объема энергоресурса для преодоления планируемого маршрута. Избыток энергоресурса приводит к увеличению массы АНПА и необходимости дополнительных затрат на транспортировку этой массы. Точный расчет необходимого запаса может привести к исчерпанию энергоресурса до того, как АНПА достигнет конечной точки маршрута. На пути АНПА возможно возникновение нештатных ситуаций, приводящих к перерасходу энергоресурса: обход препятствий, течения, плотный ледоход, рыболовные сети, мусорные острова и т.д. В связи с этим при планировании МЗ необходимо предусматривать возникновение условий, способных привести к перерасходу энергоресурса. Исчерпание энергоресурса до прибытия АНПА в конечную точку маршрута может привести к невыполнению поставленной в МЗ задачи, потере полезной нагрузки, аварии или затоплению АНПА, к дополнительным финансовым и временным расходам на поиск и подъем АНПА, ремонт, к экологическим негативным последствиям, вплоть до угрозы человеческим жизням.

Под аварией будем понимать возникновение негативных событий, приводящих к ущербу, оцениваемому существенными материальными затратами [1-10].

В связи с этим перед выполнением МЗ требуется оценка риска возникновения аварии АНПА при полном израсходовании энергоресурса. Эти результаты позволили бы в случае высокого риска возникновения аварии из-за нехватки энергоресурса увеличить его запас, скорректировать МЗ, заменить планируемый АНПА на АНПА с более энергоемкой аккумуляторной батареей либо дождаться более благоприятных условий внешней среды и т.д. Этим определяется актуальность работы.

Ранее для оценки риска авторами предложен подход, основанный на определении риска как произведения вероятности возникновения аварии и вероятности ущерба определенной степени. Для определения этих вероятностей предложено использовать динамическую байесовскую сеть, представленную в виде графа, приведенного на рисунке 1.

В предложенном ранее подходе для определения вероятностей при последовательном переходе от одного узла графа к другому предлагалось использовать экспертные оценки. Однако экспертные оценки носят субъективный характер, и, кроме того, при проведении исследований далеко не всегда удается найти квалифицированных экспертов по всем рассматриваемым направлениям – от оценки влияния внешней среды до оценки ущерба, выраженного стоимостью работ по устранению последствий аварий.

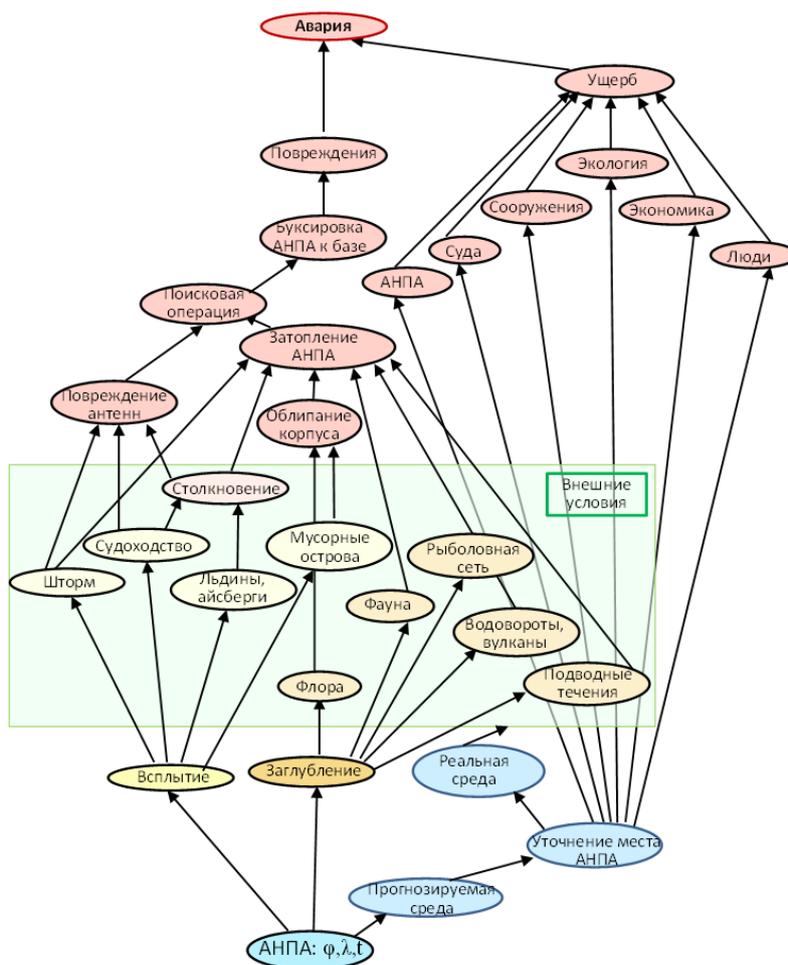


Рис.1 – Вид графа байесовской сети

В связи с этим в настоящей работе предлагается при оценке риска перейти от использования экспертных оценок к имитационному моделированию процессов перед возникновением аварии.

Целью работы явилась разработка имитационной модели оценки риска возникновения аварии АНПА дальнего плавания.

1. Постановка задачи

Пусть АНПА задано МЗ, маршрут проходит через районы, отличающиеся внешней средой. На борту АНПА имеется ограниченный запас энергоресурса.

На пути АНПА могут возникнуть непредвиденные внешние условия:

- необходимость обхода внезапно возникших препятствий; из-за ограниченности сектора обзора средств обнаружения АНПА выбранный путь обхода может оказаться не самым энергоэкономичным;

- ледоход, требующий осторожного движения АНПА с неоптимальной скоростью во избежание столкновений с льдинами. Кроме того, для предотвращения столкновений с морским льдом и айсбергами АНПА вынужден их обходить или расходиться с ними, увеличивая, тем самым, проходимый путь;

- течения, приводящие к увеличению проходимого пути по сравнению с прогнозируемым для постоянной корректировки местоположения АНПА;

- неоптимальный режим работы устройств, приборов и механизмов из-за возможного повреждения корпуса и забортных приборов и устройств АНПА,

неоптимальных условий и режимов работы источников электроэнергии;

– преждевременная деградация аккумуляторной батареи из-за понижения температуры в холодной воде или после превышения допустимого для нормальной работы аккумуляторной батареи количества циклов заряда-разряда.

Необходимо оценить риск возникновения аварии.

2. Предлагаемое решение

Количественная оценка риска характеризует степень угрозы возникновения аварийных ситуаций и возникающего при этом ущерба, и определяется произведением вероятности негативного события (аварии) на величину возможного ущерба от него [11, 12]:

$$R = P \cdot Y,$$

где R – величина риска;

P – вероятность возникновения аварии АНПА;

Y – ущерб от аварии, выраженный в финансовых затратах.

Из выражения (1) следует, что для оценки риска возникновения аварии необходимо определить вероятность возникновения аварии и ущерб от ее возникновения. Авария может возникнуть по причине самовозгорания на АНПА, пожара, взрыва, в связи с чем необходимо определить вероятность возникновения условий, способных привести к возникновению аварии. Для этого, прежде всего, проанализируем причины полного расхода энергоресурса и возможные повреждения АНПА, способные привести к условиям возникновения аварии.

Анализ причин, приводящих при полном исчерпании ресурса к аварии, показал, что на риск возникновения аварии влияние оказывают:

- выбор алгоритма всплытия/заглубления;
- состояние морской поверхности (штиль, шторм);
- наличие ледохода разной густоты;
- наличие мусорных образований;
- высокая/низкая плотность судов;
- наличие инженерных сооружений;
- наличие рыболовных сетей;
- проведение водолазных работ;
- наличие скал;
- наличие зон коммерческих, административных, политических интересов;
- рельеф дна;
- подводная фауна.

Использование имитационного моделирования позволит формировать различные тактические эпизоды поведения АНПА при окончании энергоресурса и оценивать вероятность возникновения аварии и вероятность получения ущерба определенного размера. Ниже приведена структура имитационной модели оценки риска возникновения аварии и описание каждого блока из состава имитационной модели.

Для определения необходимых блоков имитационной модели рассмотрим подробнее факторы, необходимые для моделирования тактического эпизода.

Тактический эпизод состоит из следующих последовательных этапов:

- маневр АНПА по глубине (всплытие – заглубление);
- выход на связь;
- прибытие поисковой группы;
- транспортировка на базу;
- нахождение на базе для ремонта.

В связи с этим по каждому из указанных этапов потребовалась разработка имитационного блока. Описание блоков приведено ниже.

3. Описание блоков имитационной модели

3.1. Блок моделирования маневра АНПА по глубине (всплытие – заглублиение)

При всплытии разыгрывалось состояние внешней среды: открытые воды, прибрежные воды, ледовая обстановка, припай [13].

Открытые воды определяются как районы, удаленные от прибрежной и транспортной полосы. Эта среда позволяет АНПА безопасно всплывать на поверхность воды для обсервации и проведения сеанса радиосвязи со спутником или пунктом управления. Кроме того, в случае непредвиденных обстоятельств или чрезвычайной ситуации АНПА также может в случае необходимости всплыть на морскую поверхность. Как правило, открытые воды обеспечивают относительно благоприятную среду для работы АНПА. Работа АНПА в открытых водах практически безопасна при нахождении АНПА в толще морской воды.

Однако состояние внешней среды представляет опасность при нахождении АНПА на поверхности воды из-за высокой волны, сильного ветра или повышенного судоходства. В этом случае АНПА в целях безопасности отказывается от всплытия и вынужден либо продолжать движение под водой, увеличивая ошибки навигации, либо в режиме позиционирования ожидать уменьшения волнения. Из-за поверхностной реверберация ухудшается гидроакустическая связь и дальность обнаружения гидроакустических средств освещения обстановки; при нахождении на поверхности в условиях волнения ухудшается радиосвязь. В результате для повышения безопасности АНПА требуются дополнительные затраты энергоресурса для увеличения мощности связного оборудования, средств освещения обстановки, работы подруливающих устройств в режиме позиционирования.

Прибрежные воды представляют собой участок раздела между сушей и океаном, включая воды от края шельфа в сторону берега. Характеризуются высокой плотностью судов, нахождением инженерных сооружений, проведении водолазных работ, рыболовных сетей, слабая прозрачность воды, сильные течения, быстрое пространственное и временное изменение глубины воды и волны на мелководье (приводят к увеличению помех и сокращению дальности обнаружения средствами освещения обстановки и гидроакустических средств связи), возможная группа островов (несколько островов, находящихся вблизи побережья материковой части). Топология морского дна вблизи группы островов обычно чрезвычайно сложная. Все перечисленные условия могут привести к столкновению с препятствиями и затоплению АНПА. В связи с этим средства освещения обстановки, работающие в активном режиме, задействованы на максимальную дальность обнаружения препятствий, что приводит к повышенному энергорасходу за счет потребления энергии дополнительным оборудованием.

Кроме того, в целях исключения столкновения с судами, инженерными сооружениями, при встрече с рыболовными сетями и запутывании в них требуется маневрирование АНПА с задействованием дополнительных исполнительных механизмов и увеличения проходимого пути. Маневрирование также необходимо после отклонения от маршрутной траектории для последующего возвращения на нее. Все это приводит к увеличению потребления энергоресурса.

Морской лед и айсберги создают опасность столкновения с ними АНПА, что может привести к физическим повреждениям забортных компонентов и подсистем АНПА, таких как винты, рули, элементы антенн, обшивка корпуса АНПА, датчики и забортные навигационные системы. При движении среди айсбергов также возникает опасность столкновения, так как айсберг представляет собой массивный отколовшийся от ледника кусок льда произвольной формы, который выступает над уровнем моря более чем на 5 м, находящийся на плаву или сидящий на мели (пирамидальные, столбообразные,

куполообразные, наклонные). Айсберги отличаются крайне неравномерным таянием и разрушением их подводной части, вследствие чего положение их центра тяжести существенно изменяется, и они плавают, находясь часто в состоянии неустойчивого равновесия. При их опрокидывании может произойти потеря АНПА. В арктических морях России айсберги наблюдаются в Баренцевом море, на севере и востоке Карского моря, в западной части моря Лаптевых и в Чукотском море.

В целях предотвращения столкновений с морским льдом и айсбергами необходимо их обходить или расходиться с ними, увеличивая пройденный путь.

В случае повреждения корпуса АНПА и выступающих за его корпус винтов, рулей и т.д. возникает потеря управляемости АНПА и необходимость реконфигурации [12] системы управления движением в целях поддержания АНПА на плаву. В результате движение АНПА будет происходить в неоптимальных режимах с точки зрения потребления энергоресурса. Порча забортных датчиков и измерителей параметров внешней среды приведет к отсутствию актуальных данных о внешней среде и выбору неоптимальных режимов работы систем АНПА. Для повышения безопасности движения АНПА подо льдом наряду с освещением обстановки в горизонтальной плоскости также требуется освещения обстановки в вертикальной плоскости. Приведенные негативные последствия влияния внешней среды на работу АНПА приводит к увеличению энергопотребления.

Припай представляет собой неподвижный лед, прикрепленный к берегу. Он состоит из крупных льдин, разделенных трещинами, иногда польнями. Средняя толщина многолетних льдов 2,5-3 м и более. Поверхность пакового льда ровная или волнистая, но иногда ее нарушают торосы – беспорядочные ледяные нагромождения высотой до 5-10 м, образующиеся в результате столкновения льдин при сжатии. Особенно обильны торосы в окраинной части паковых льдов. Иногда близ границ паковых льдов и молодых однолетних льдов встречаются торосы высотой до 20 м. Кроме морского льда, в полярных морях встречаются мощные глыбы материкового льда – айсберги, оторвавшиеся от ледниковых покровов, сползающие к морю у берегов Земли Франца-Иосифа, Новой Земли, Северной Земли и некоторых других островов. В таких условиях движение АНПА происходит под ледниками. В результате возможно чрезмерное заглубление АНПА из-за резкого ухода глубины и вероятного столкновения со скалами, в связи с чем АНПА должен быть оснащен активными средствами освещения обстановки с повышенной дальностью обнаружения препятствий, оценки его размеров и уклонения от столкновений с элементами льда, что приведет к повышению энергопотребления.

Полагалось, что степень повреждения АНПА в условиях шторма пропорциональна уровню волнения (в баллах) и силе ветра. Степень повреждения АНПА в результате столкновения с судами пропорциональна плотности судоходства, которую можно получить по данным, например, на сайте MarineTraffic.com; в этом случае это может быть не просто столкновение с кораблем, а корабль способен утащить АНПА перед собой, то есть сместить АНПА из исходного положения. Степень повреждения АНПА при попадании в ледовую обстановку или мусорные образования из бытовых отходов пропорциональна отношению площади, покрытой мусором или льдом, к площади акватории, в которой АНПА остался без энергии.

При заглублении степень повреждения АНПА определяется рельефом морского дна. Так, при заглублении в условиях сложного рельефа степень повреждения определяется процентным соотношением площади гладких участков, с незначительными возвышенностями и сложными участками с хребтами и ущельями. Степень повреждения в условиях попадания АНПА в рыболовные сети определяется вероятностью попадания АНПА в районы активного рыболовства. Вероятности влияния

подводной флоры и фауны, попадания АНПА в подводные течения, водовороты и подводные вулканы крайне мала, и может быть принята равной, например, 0,005. Вероятность повреждения антенн, винтов, рулей, корпуса АНПА принимается равной вероятности столкновения с объектом.

3.2. Блок моделирования выхода на связь

Блок имитации выхода на связь учитывал степень повреждения связной антенны и других элементов связного тракта. При повреждении антенны успешность выхода на связь с поисково-спасательной группой или базой принималась пропорциональной степени повреждения антенны и элементов связного тракта.

3.3. Блок моделирования прибытия поисковой группы

Имитация прибытия поисково-спасательной группы к месту нахождения АНПА учитывала удаленность места базирования до АНПА, погодные условия (благоприятные / неблагоприятные), скорость движения поисковой группы, время на поиск и обнаружение обесточенного АНПА.

3.4. Блок моделирования транспортировки АНПА на базу

Имитация транспортировки АНПА на базу учитывала удаленность АНПА до места ремонта, погодные условия (благоприятные / неблагоприятные), скорость транспортировки АНПА.

3.5. Блок моделирования возникновения ущерба на базе нахождения АНПА после аварии

Имитация нахождения АНПА в базе учитывала степень повреждения АНПА, в том числе – возможность возникновения взрыва/пожара, удаленность задний, сооружений, судов, кораблей от АНПА, затраты на их ремонт в случае повреждения от взрыва/пожара.

4. Алгоритм работы имитационной модели

На вход алгоритма расчета вероятности повреждения АНПА и возникновения ущерба с использованием разработанной динамической байесовской сети поступают данные:

- текущие место-время окончания у АНПА запаса энергоресурса;
- процентное соотношение типов среды для каждого узла рассматриваемого района;
- вероятности изменения состояния среды при переходе из одного узла в другой и при переходе от одного момента времени в другой (рисунок 2);
- вероятности влияния условий внешней среды на состояние АНПА.

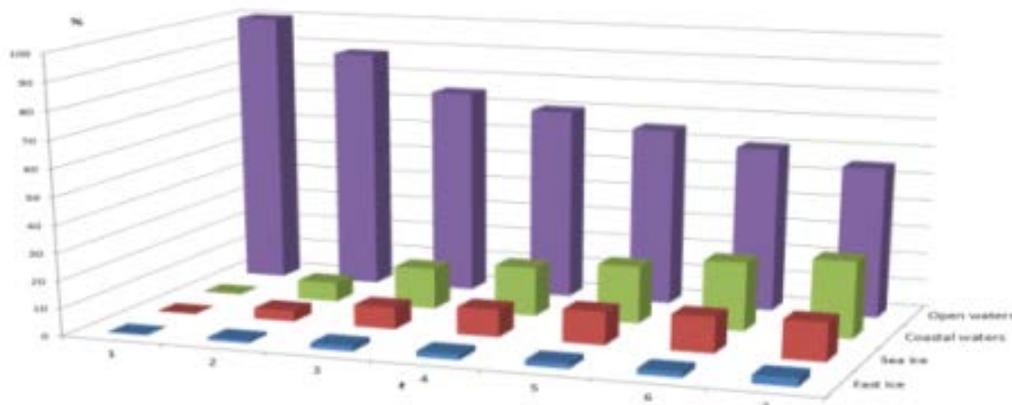


Рис. 2 – Изменение процентного соотношения типов внешней среды с течением времени

Шаг 1. Определение фактической внешней среды в точке положения АНПА в момент окончания энергоресурса.

Для определения фактической внешней среды в точке положения АНПА используем координаты АНПА и таблицу зависимости степени неопределенности местоположения АНПА от состояния среды. Фактическая внешняя среда в точке положения АНПА определяется сочетанием прогнозируемой внешней среды и прогнозированием неопределенности местоположения АНПА. При определении вероятности учитывается тот факт, что неопределенность оценки местоположения в открытой воде низкая из-за относительно точной навигации. В то же время неопределенность определения местоположения подо льдом существенно выше из-за относительно неточной подводной навигации, поскольку сигналы спутниковых навигационных систем не проникают через толщу воды или льда, а использование других методов навигации в указанных условиях способно привести к относительно высокой неопределенности предсказания местоположения АНПА.

Результатом имитации внешней среды на шаге 1 является определение координат (x,y,z) местоположения АНПА.

Шаг 2. По координатам (x,y,z) положения АНПА определяется процентное соотношение типов внешней среды в этой точке.

Шаг 3. Определение влияния состояния внешней среды и требований скрытности на принятие решения системой управления АНПА [] на всплытие или заглублие.

Шаг 4. Определение влияния негативных факторов на повреждение АНПА.

Шаг 5. Вероятность проведения своевременной поисковой операции определяется состоянием среды, удаленностью места погружения / всплытия АНПА от баз, положением АНПА (в мусорном острове или среди льда). Вероятность способности АНПА к буксировке до базы определяется состоянием АНПА и состоянием среды при переходе от места всплытия до базы.

На этом алгоритм оценки вероятности возникновения повреждений закончен. На выходе разработанного алгоритма определяется значение вероятности повреждения АНПА, способного, в зависимости от окружения АНПА, привести к ущербу разного размера, который определяет возникновение аварии. Таким образом, для оценки риска возникновения аварии необходимо также получить вероятность возникновения ущерба и оценить его размер.

5. Ущерб от возникновения повреждений АНПА

При имитации полагаем, что если АНПА по связи не смог своевременно сообщить об аварии, то его начнут искать по тайм-ауту, то есть по прошествии некоторого контрольного времени, означающего, что на АНПА произошла нештатная ситуация. В этом случае ключевую роль в оценке повреждений играет время, прошедшее с момента расхода энергоресурса.

При имитации также учитывалось, что степень повреждения антенн оказывает влияние на вероятность выхода на связь, и если вероятность выхода на связь низкая, то поисково-спасательные операции начнутся позже, чем, если бы аварийное сообщение удалось бы передать своевременно. Вероятность своевременного начала операции, то есть когда АНПА на плаву или с активным аварийным маяком-ответчиком, способно обеспечить высокую вероятность успешного проведения поисково-спасательной операции. Промедление в выполнении поисково-спасательной операции способно привести к затоплению и/или потере АНПА, или к взрыву.

При незначительных повреждениях, не приводящих к фатальным последствиям, ущерб оценивается затратами на проведение поисковых операций и на транспортировку АНПА в случае невозможности самостоятельного его движения. Кроме того, в ущерб

включаются затраты на ликвидацию повреждений АНПА. Так, повреждение корпуса, рулей винтов приводит к ущербу, выраженному затратами на проведение ремонтных работ АНПА, низкой вероятности буксировки. Размер ущерба в виде затрат на ремонт только АНПА определяется отсутствием в зоне вокруг АНПА кораблей, судов, зданий, инженерных сооружений и т.д. При возникновении взрыва на борту АНПА ущерб оценивается не только затратами на операции, связанные с поиском, обнаружением и транспортировкой АНПА, но и экологическим загрязнением окружающей среды, требующим дополнительных затрат на ее очистку и локализацию для дальнейшего нераспространения. Размер ущерба окружающего имущества вызван нахождением в зоне взрыва АНПА причалов, сооружений, судов, кораблей и т.д., и оценивается затратами на их ремонт. Размер ущерба, связанного с нарушением экологии, вызван взрывом или выделением вредных веществ и определяется затратами на предотвращение выделения вредных веществ в окружающую среду и на устранение последствий их негативного влияния на экологию.

Размер ущерба, связанного с появлением пострадавших, зависит от нахождения непосредственно рядом с АНПА во время взрыва людей, обслуживающего персонала, разработчиков, заказчиков и определяются затратами на лечение, выплату компенсаций, страховок, предоставления льгот и т.д.

В случае аварийного заглублиения АНПА ущерб оценивается дополнительными затратами на проведение поисковых операций под водой, обнаружению, подъему и транспортировке АНПА к пункту назначения. Ущерб определяется не только затратами, но и ценностью технологий, реализованных в АНПА, закрытостью информации, и т.д.

6. Результаты численных экспериментов

С использованием разработанной имитационной модели проведены численные эксперименты, направленные на оценку риска возникновения аварии.

При проведении численного эксперимента рассматривалось положение АНПА в момент окончания энергоресурса в ледовой обстановке. Расчет вероятности повреждения АНПА и возникновения аварии происходил с использованием ветки графа: АНПА $\varphi, \lambda, t \rightarrow$ Всплытие \rightarrow Лдины, айсберги \rightarrow Столкновение \rightarrow Повреждение антенн \rightarrow Поисковая операция \rightarrow Буксировка АНПА к базе \rightarrow Повреждение \rightarrow АНПА \rightarrow Ущерб \rightarrow Авария.

Для определения вероятности возникновения аварии рассмотрены следующие три варианта аварийного всплытия АНПА:

Вариант 1. АНПА всплыл в условиях льда с низкой плотностью ледохода и минимальным волнением с передачей аварийного сообщения и ожидания прибытия ПСС. База расположена рядом с местом всплытия АНПА, поэтому ПСС прибыла оперативно, быстро нашла АНПА и смогла его отбуксировать к базе. В ходе буксировки повреждений АНПА не произошло. Соответственно, состояние АНПА не причинило ущерба ни АНПА, ни окружению; требуется лишь подзаряд аккумуляторной батареи.

Вариант 2. АНПА всплыл в районе со средней плотностью ледохода, поэтому с течением времени возможно возникновение повреждений АНПА. Поисково-спасательная служба прибыла оперативно, быстро нашла АНПА и смогла его отбуксировать, однако при движении в условиях средней плотности льда из-за скорости буксира влияние плотности льда усилилось, в результате чего в ходе буксировки возникли незначительные повреждения АНПА. Ущерб определяется затратами на ремонт АНПА.

Вариант 3. АНПА всплыл в условиях густого льда, из-за чего из-за усилившегося волнения связь оказалась неустойчивой, и на передачу аварийного сообщения было затрачено определенное количество времени, сообщение было передано не сразу. В условиях темного времени суток и сильного ветра ПСС прибыли через значительное время. За это время из-за густого льда произошло повреждение АНПА (если бы ПСС

прибыли раньше, то повреждения бы не произошло). За время ожидания ПСС АНПА отнесло течением от точки выхода на сеанс связи. Из-за погодных условий поисковая операция затянулась, вероятность обнаружения АНПА снизилась, в результате чего потребовалось длительное время на обнаружение АНПА. База, к которой необходимо отбуксировать АНПА, оказалась на значительном расстоянии от места обнаружения АНПА, и при движении в условиях густого льда из-за скорости буксира влияние густого льда усилилось, что привело к серьезным повреждениям АНПА, заполнению водой внутриотсечного помещения. В результате АНПА получил значительные повреждения и неспособность к восстановлению.

Весь временной процесс спасения АНПА от момента выхода его на связь с базой до прибытия в базу разделен на три периода: от выхода на связь и передачи аварийного сигнала – до прибытия ПСС; от прибытия ПСС до поиска и момента обнаружения АНПА ПСС; от обнаружения АНПА ПСС до буксировки АНПА к базе. Продолжительность этих периодов не зависит от действий АНПА, но зависит от оперативности работы ПСС, удаленности базы, погодных условий, времени суток и т.д. Таким образом, при оценке вероятности возникновения повреждения АНПА учитывалось время, которое АНПА пришлось находиться на морской поверхности после всплытия.

В ходе численного эксперимента определялась степень повреждения АНПА для различных ледовых условий, и затем – по времени, потребовавшемуся для приведения АНПА к базе – оценивалась вероятность возникновения аварии.

Для определения вероятности повреждения АНПА от столкновения с N льдинами использовалось выражение: $P=1-(1-P_0)^N$, где P_0 – вероятность повреждения АНПА от столкновения с одиночной льдиной. Для определения количество льдин N , с которыми АНПА столкнется, учитывалось, что N зависит от интенсивности, которая определяется, в свою очередь, количеством льдин, проходящих рядом с АНПА в единицу времени в заданном коридоре ± 10 м по сторонам от АНПА; при этом предполагалось однородное распределение льда по ширине коридора вокруг АНПА.

Результаты численных экспериментов приведены на рисунке 3, по горизонтальной оси отложено время в часах, по вертикальной – вероятность повреждения АНПА.

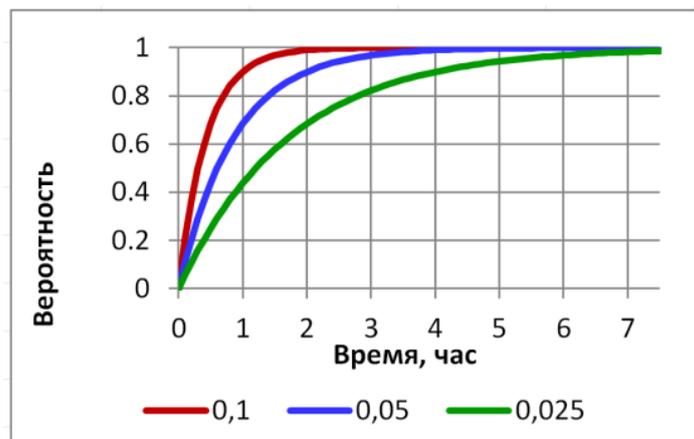


Рис. 3 – Зависимость вероятности повреждения АНПА от времени его нахождения на морской поверхности в обесточенном состоянии

На рисунке 3 представлены три кривые, соответствующие описанным выше вариантам аварийного всплытия АНПА: нижняя линия зеленого цвета соответствует низкой густоте и интенсивности движения льдин $0,025 \text{ м}^2/\text{час}$, линия синего цвета – средней густоте и интенсивности движения льдин $0,05 \text{ м}^2/\text{час}$, верхняя линия – высокой

густоте и интенсивности движения $0,1 \text{ м}^2/\text{час}$.

Анализ результатов, приведенных на рисунке 3, показал, что в течение первого получаса вероятность повреждения АНПА незначительна и не превышает 0,2 по вероятности. С увеличением времени нахождения АНПА в условиях ледохода вероятность повреждения возрастает, и уже через 2 часа нахождения АНПА на поверхности воды достигает 0,68 в условиях низкой плотности льда, 0,91 – в условиях средней плотности льда и 0,99 – в условиях высокой плотности льда.

Пусть задано критическое значение вероятности P^* повреждения АНПА, при котором возникает ущерб АНПА, способный привести к аварии. Примем, что при $P^* = 0,25$, возникает авария. Тогда в результате применения описанного выше алгоритма получаем оценку вероятности P возникновения аварии. Для этого проверяем выполнение условия: $P > P^*$, и если это условие выполнено, то считаем, что существует риск возникновения аварии.

Заключение

Рассмотрена задача оценки риска возникновения аварии в условиях полного расхода энергоресурса АНПА до окончания выполнения маршрутного задания и варианты поведения АНПА в виде всплытия или заглужения. Описаны возможные сценарии развития событий, связанные с возможностью выхода АНПА на связь для передачи аварийного сообщения, со столкновением АНПА с судами, льдинами, с попаданием в течения, водовороты, мусорные острова и т.п. Для всех ситуаций разработан алгоритм определения вероятности повреждения АНПА. В зависимости от окружения АНПА в момент полного расхода энергоресурса проведена оценка размера ущерба.

Разработана имитационная модель оценки риска возникновения аварии, учитывающая степень повреждения АНПА, степень причинения ущерба определенного размера, оценку размера ущерба и риск возникновения аварии.

На конкретном примере показано применение разработанной имитационной модели оценки риска возникновения аварии в различных условиях ледохода и временных задержек прибытия поисково-спасательных средств из-за сложных погодных условий.

Результаты имитационного моделирования позволяют рассмотреть функционирование АНПА в различных условиях и на основе риска возникновения аварии заблаговременно сделать вывод о необходимости пересмотра маршрутного задания, выборе более энергосодержащего АНПА или замены источника электроэнергии на более энергоемкий, выжидании более благоприятных внешних условий и т.д. для того, чтобы снизить риски аварии при отсутствии у АНПА энергии.

Литература

1. **Kirkwood W.J.** AUV incidents and outcomes / W.J. Kirkwood // Conference: OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. (Biloxi, 26-29 October 2009). – Biloxi, 2009. DOI: 10.23919/OCEANS.2009.5422322.
2. **Thieme Ch.A., Utne I.B., Schjølberg I.** A Risk Management Framework for Unmanned Underwater Vehicles Focusing on Human and Organizational Factors / Ch.A. Thieme // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. (St. John's, Newfoundland, Canada, 31 May – 5 June 2015). – Newfoundland, 2015. DOI: 10.1115/OMAEE2015-41627.

3. **Brito M.P.** Risk analysis for Autonomous Underwater Vehicle Operations in Extreme Environments / M.P. Brito, G. Griffiths, P. Challenor // Risk Analysis. – 2010. – vol. 30, is. 12. – P. 1771-1788. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01476.x.
4. **Chen X.** A Review of Risk Analysis Research for the Operations of Autonomous Underwater Vehicles / X. Chen, N. Bose, M. Brito, F. Khan, B. Thanyamanta, T.Zou // Reliability Engineering & System Safety. 2021. vol. 216. 108011.
5. **Brito M.P.** Analysis of causation of loss of communication with marine autonomous systems: A probability tree approach / M.P. Brito, D.A. Smeed, G. Griffiths // Methods in Oceanography. 2014. vol. 10. P. 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2014.07.003>.
6. **Alexander Ch.** A risk model for autonomous marine systems and operation focusing on human–autonomy collaboration / Ch. Alexander, I. Bouwe // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O Journal of Risk and Reliability. 2017. no. 2017231(4). P. 446-464. DOI:10.1177/1748006X17709377.
7. **Brito M.** A Bayesian approach for predicting risk of autonomous underwater vehicle loss during their missions / M. Brito, G. Griffiths // Reliability Engineering & System Safety. – February 2016. vol. 146. P. 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.004>.
8. **Chen X.** A copula-based method of risk prediction for autonomous underwater gliders in dynamic environments / X. Chen, N. Bose, M. Brito, F. Khan, T. Zou // Risk Analysis. – January 2024. vol. 44, is. 1. P. 244-263. <https://doi.org/10.1111/risa.14149>.
9. **Meng L.** Enhanced Safety Control and Self-Rescue System Applied in AUV / L. Meng, Y. Qingyu // Conference: Proc. Int Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) Conf. (Changsha, China, 11-12 May 2010). Changsha, 2010. DOI:10.1109/ICICTA.2010.745.
10. **Jensen F.V.** Bayesian Networks and Decision Graphs. / F.V. Jensen, T.D. Nielsen. – New York: – Springer, NY 10013, USA, 2007. P. 447.
11. **Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитровский В.А.** Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42). т. 3. С.11-18.
12. **Фаустова О.Г.** Разработка метода интегральной оценки и управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций для повышения безопасности морских судов. Дис. канд. техн. наук. – Калининград. 2016. – 200 с.
13. **Yang R., Utne I.B., Liu Y.N.** PaltrinieriDynamic Risk Analysis of Operation of the Autonomous Underwater Vehicle / R. Yang, // The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (Venice, Italy, 1-5 November 2020). – Venice, 2020. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0_4118-cd.
14. **Мартынова Л.А.** Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата / Л.А. Мартынова, Н.К. Киселев, А.А. Мысливый // Информационно-управляющие системы. 2020. С. 31-41.
15. **Мартынова Л.А.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА / Л.А. Мартынова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич, А.И. Соколов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50-58.
16. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474-479.