

## **Управление и принятие решений при контроле прочности судна на основе современной теории катастроф**

*Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. П. Прохнич<sup>1</sup>, Калининград,  
Ю. И. Нечаев<sup>2</sup>, Санкт-Петербург*

Рассматривается подход, основанный на интерпретации текущих ситуаций с использованием бортовой интеллектуальной системы (ИС) обеспечения безопасности мореплавания. Подход позволяет в условиях неопределенности представить физическую картину развития ситуации и построить ее динамическую модель на основе современной теории катастроф. В качестве примера обсуждается ситуация, связанная с потерей прочности на волнении.

**Ключевые слова:** нелинейная система, принятие решений, теория катастроф

**Management and decision-making at the control the strength of the vessel on the basis of the modern theory of catastrophes.** *Eugene P. Burakovsky, Pavel E. Burakovsky, Vladimir P. Prokhnich, Kaliningrad state technical university, Yury I. Nechaev, Saint-Petersburg state marine technical university.*

The approach is based on an interpretation of the current situation with the on-board intelligent systems (IS) to ensure safety of navigation. The approach allows the uncertainty present in the physical picture of the situation and build it based on a dynamic model of the modern theory of catastrophes. As an example, discusses the situation involving the loss of strength at sea

**Keywords:** nonlinear system, decision-making, catastrophe theory

### ***1. Теория катастроф в интеллектуальных системах новых поколений***

Разработка интеллектуальных систем (ИС) новых поколений осуществляется на основе достижений современной теории катастроф в соединении с современным математическим аппаратом и средствами высокопроизводительных вычислений. Практика эксплуатации морских судов свидетельствует о том, что неопределенность ситуации представляет собой одну из наиболее сложных проблем при анализе и прогнозе поведения судна в различных условиях эксплуатации. Отсутствие достоверных данных о динамике судна и внешней среды, неполнота исходной информации значительно затрудняет интерпретацию нестандартных (нештатных и экстремальных) и аварийных ситуаций [1]–[24]. В настоящей статье развивается подход, основанный на использовании бортовой ИС обеспечения безопасности мореплавания, функционирующей на основе динамической базы знаний [6]. Интерпретация текущей ситуации позволяет построить алгоритм контроля с использовани-

---

<sup>1</sup> *Бураковский Евгений Петрович, Бураковский Павел Евгеньевич, Прохнич Владимир Прокофьевич, Калининградский государственный технический университет.*

<sup>2</sup> *Нечаев Юрий Иванович, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. nechaev@ifmo.mail.ru*



ем современной теории катастроф [10], позволяющей в условиях неопределенности представить физическую картину развития ситуации и построить ее динамическую модель. В качестве примера такой интерпретации обсуждается одна из наиболее сложных аварийных ситуаций, вызвавшая большой интерес специалистов, занимающихся совершенствованием критериальной базы и архитектурных решений при обеспечении безопасности мореплавания морских судов новых поколений [19], [20], [23]. В процессе анализа отмечены особенности ситуации, которые требуют более детального анализа на основе концепции современной теории катастроф [10].

## 2. Авария танкера «Находка» в сложной динамической среде

1

Танкер «Находка» разломился и затонул у берегов Японии в 1996 году. Архитектурно-конструктивный тип, соотношения главных размерений и характеристики танкера «Находка» являются типичными для судов подобного класса. Длина судна составляет  $L=166$  м, ширина  $B=22,4$  м, осадка  $T=9,38$  м и высота борта  $H=12,32$  м. Удары волн в носовую оконечность привели к потере прочности и гибели судна. Замеры состояния корпусных конструкций показали, что судно было в тяжелом состоянии из-за изношенного корпуса и не выдержало реально действующих динамических нагрузок.

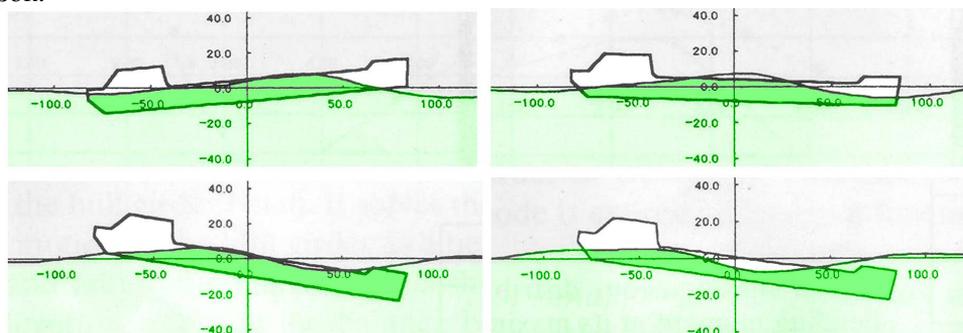


Рис.1. Движение судна на экстремальном волнении

Обсуждение физических закономерностей аварии проведем на основе результатов математического моделирования динамики взаимодействия судна с внешней средой, выполненных в работах [20], [23]. Состояние штормового моря в момент аварии характеризовалось 8-балльным волнением, а скорость судна составляла около 8 узлов и снижалась до 3,5 узла. Процесс колебательного движения судна представлен на рис. 1 в виде последовательных фрагментов, соответствующих различным фазам встречи судна с набегающей волной.

Как видно из этого рисунка, килевая качка судна приводила к периодическому погружению носовой оконечности в волновое поле и значительному заливанию носовой части корпуса. Наиболее неблагоприятная фаза соответствует последнему фрагменту рис. 1, из которого следуют основные



«скрытые» закономерности процесса взаимодействия, обсуждение которых проведем с позиций гидродинамического взаимодействия и особенностей состояния прочности корпуса.

**Особенности гидродинамического взаимодействия.** Периодическое погружение в воду носовой оконечности на встречном волнении приводило к существенному изменению режима обтекания палубы. Динамика взаимодействия в этих условиях характеризуется возникновением значительных нагрузок, вызванных асимметричным обтеканием погруженной палубы, которую можно рассматривать как крыло сложной формы, расположенное под углом атаки к набегающему потоку жидкости [7]. Кроме того, потеря площади ватерлинии (до 50% и более) вызывала периодическое ухудшение продольной и поперечной остойчивости. В результате возникало явление попадания судна в «потенциальную яму» [17], приводящее к существенному снижению сопротивляемости судна внешним динамическим нагрузкам. Гидродинамическая задача о нелинейной продольной качке в рамках дифференциального уравнения с периодическими коэффициентами вообще не рассматривалась в работах по теории качки и остойчивости судов на волнении [7]. Имеющиеся теоретические и экспериментальные исследования касались только поперечной остойчивости на попутном волнении, а вопросы качки на продольном волнении выполнены в детерминированной постановке на основе линейных моделей. Выявленные в процессе анализа «скрытые» эффекты взаимодействия привели к возникновению катастрофы и гибели судна. Оценка остойчивости при указанной потере площади ватерлинии показала, что реальные ее характеристики составляют приблизительно 50% от номинальных значений, а гидродинамические нагрузки при обтекании палубы почти на порядок превышали обычные силы и моменты, действующие в носовой оконечности судна при качке на нерегулярном волнении.

**Особенности оценки прочности** судна в результате периодического погружения носовой оконечности проведем с позиций эксплуатационной прочности. В условиях изношенного корпуса динамика взаимодействия судна с внешней средой существенно изменялась. Этот процесс усугублялся возникновением закономерностей, не учитываемых в процессе проектирования судов подобной архитектуры. Действительно, появление значительных динамических нагрузок вследствие обтекания палубы погруженной в воду носовой оконечности вообще не рассматривалось в практических задачах прочности и при проектировании судов. Как показывают предварительные оценки, проведенные на основе данных работы [20], [23], возникающие нагрузки от действия гидродинамической силы и момента при асимметричном обтекании палубы приводили к недопустимым напряжениям, возникающим в корпусных конструкциях, величина которых в несколько раз превышала нормируемые значения. В результате изношенный корпус оказался не способным к восприятию действующих сил и судно, потеряв прочность, разломилось и затонуло.



**Совершенствование архитектурного решения.** Тяжелые аварии с танкерами подобного класса в последние годы постоянно напоминали разработчикам о просчетах и недостатках архитектурно-конструктивных решений. Об этом свидетельствуют материалы периодической печати [19], [22]. Особый интерес вызывают предложения по совершенствованию формы носовой оконечности танкеров данного класса, приведенные в работе [22]. На рис. 2 представлен вариант такого решения, получивший название «ахе bow» («топорообразный нос»).



1

**Рис. 2.** Новое архитектурное решение в проектировании обводов носовой оконечности

Как видно из этого рисунка, авторами предлагается принципиально новый подход к архитектурному решению при проектировании носовой оконечности. Этот подход предполагает снижение гидродинамических нагрузок и существенное уменьшение эффектов от заливаемости носовой оконечности. Отличительной особенностью предлагаемой архитектуры является использование обводов носовой части корпуса, имеющих вертикальный форштевень [8], [10].

### 3. Результаты моделирования динамики взаимодействия

В результате проведенного анализа аварийной ситуации было установлено, что разрушение корпуса танкера «Находка» началось с верхней палубы, потом пошло разрушение со стороны днища, и трещины сомкнулись. Для объяснения этого явления была проведена оценка динамики судна для установления причин, вызвавших разрушение палубы.

Во время качки при погружении носовой оконечности в воду палуба представляет собой крыло конечного удлинения. В результате обтекания возникает перпендикулярная к палубе сила давления  $P_y$ , складывающаяся из



двух компонент (рис. 3). Компонента  $P'_y$  обусловлена горизонтальным обтеканием водой палубы как фрагмента крыла конечной длины со скоростью

$$V_H = V_C + V_{WH} \quad (1)$$

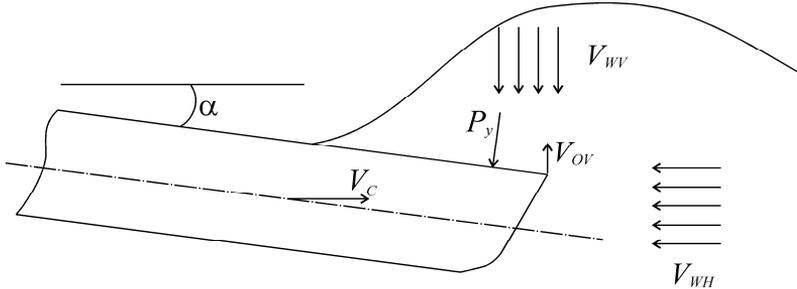


Рис. 3. Схема обтекания носовой части корпуса судна, где  $V_C$  – скорость движения судна;  $V_{WH}$  – горизонтальная скорость движения волны. Компонента  $P''_y$  обусловлена обтеканием палубы в вертикальном направлении со скоростью  $V_V$ :

$$V_V = V_{VW} + V_{OV}, \quad (2)$$

где  $V_{VW}$  – вертикальная скорость частиц воды;  $V_{OV}$  – вертикальная скорость носовой оконечности, обусловленная качкой судна.

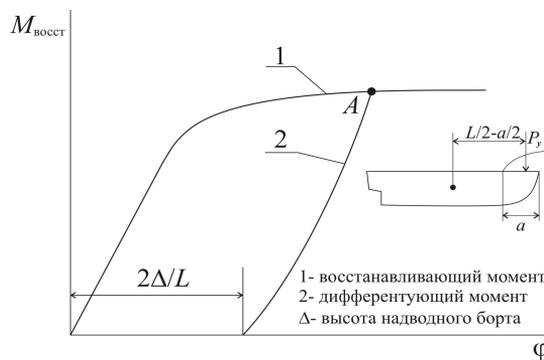


Рис. 4. Зависимость восстанавливающего и дифференцирующего моментов от крена

Для приближенной оценки значений  $P'_y$  и  $P''_y$  можно воспользоваться формулами для крыла бесконечного удлинения с некоторыми поправками:

$$P'_y \cong k_1 k_2 k_3 c_y \frac{1}{2} \rho V_H^2 F, \quad (3)$$

где  $k_1$  – некоторый коэффициент пропорциональности, связанный с обтеканием палубы вблизи раздела двух сред;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий конечность удлинения крыла;  $k_3$  – коэффициент влияния надпалубных конструкций;  $\rho$  – плотность воды. Компонент  $P''_y$  может быть оценен по формуле

$$P''_y \cong k'_1 k'_2 k'_3 c'_y \frac{1}{2} \rho V_V^2 F, \quad (4)$$

где  $F$  – погруженная площадь палубы;  $k'_1, k'_2, k'_3$  – коэффициенты, аналогичные  $k_1, k_2, k_3$ , но связанные с обтеканием в вертикальной плоскости.

Получение строгого решения задачи связано с определенными трудностями, однако приближенно можно оценить значения  $P'_y$  и  $P''_y$ , после чего



можно проанализировать поведение судна при «зарывании» носом в воду. Следует отметить, что такой режим обтекания (обтекание в двух взаимно перпендикулярных плоскостях) непродолжителен и исчисляется секундами, однако этого может оказаться достаточным для развития аварийной ситуации.

Рассмотрим вопрос о продольной остойчивости судна (рис. 4) при создании дифферента под действием момента, обусловленного силой  $P_y$ , приложенной к палубе в носовой оконечности судна

$$M_{\text{диф}} \cong P_y \cdot \left( \frac{L}{2} - \frac{a}{2} \right), \quad (5)$$

где  $a$  – длина смоченной поверхности.

Как видно из рис. 4, представленные кривые 1 и 2 пересекаются в некоторой точке А, где дифференцирующий момент становится равным восстанавливающему. В этом случае происходит «захват» носовой оконечности волной и дальнейшее развитие уже неуправляемой ситуации, а именно увеличение углов дифферента и резкого роста изгибающих моментов в корпусе судна до экстремальных значений. Практически если судно не выйдет из условия «захвата» носовой оконечности, оно будет разрушено. Заметим, что положение судна при движении к точке «А» является неустойчивым за счет асимметричности процесса обтекания, бортовой качки и т.д., поэтому сила  $P_y$  приложена к палубе не строго в ДП судна. Если же учесть, что при зарывании носовой оконечности в воду и частичном выходе из воды кормовой оконечности поперечная метацентрическая высота резко падает, то смещение центра давления на палубу  $P_y$  от ДП на некоторую величину  $\varepsilon$  даст кренящий момент  $P_y \cdot \varepsilon$ , что развернет судно под некоторым углом к вертикальной плоскости – плоскости ДП.

В этом случае помимо давления  $P_y$  на нагруженную часть палубы будет действовать некоторая сила, приложенная к палубе и направленная перпендикулярно курсу движения судна, стремясь резко развернуть судно лагом к волне. Этот разворот будет сопровождаться увеличением несимметричности давления на палубу судна, что будет дополнительно увеличивать боковую силу и при определенных условиях может произойти опрокидывание судна. Если же опрокидывание не произошло, то при получении судном некоторого крена несколько ослабнет давление  $P_y$  на палубу, и носовая оконечность будет стремительно выходить из воды с резким разворотом всего судна лагом к волне.

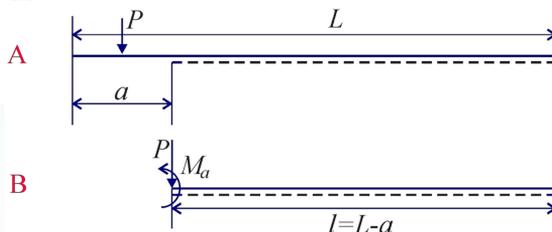


Рис. 5. Расчетные схемы корпуса судна



Оценим величину дополнительного изгибающего момента, создаваемую напором воды на погруженную часть палубы. Оценку сведем к простейшей схеме балки, лежащей на упругом основании. Ясно, что часть корпуса  $\approx (1/5 \div 1/4)$  часть, погруженная в воду, не лежит на таком основании. Тогда расчетная схема будет выглядеть, как представлено на рис. 3а, где  $a$  – погруженная в воду часть корпуса;  $P$  – суммарное давление на палубу, полученное при горизонтальном и вертикальном обтекании. При этом угол атаки в горизонтальной плоскости составлял  $\alpha = 30^\circ$ , что соответствует результатам реальной качки судна.

Отбрасывая в расчетной схеме участок «а» и заменяя его действие на балку, лежащую на упругом основании эквивалентной системой сил, получим расчетную схему на рис. 3В, где  $M_a = P \cdot a / 2$  (при условии, что равнодействующая сила давления находится в середине пролета). Дифференциальное уравнение изгиба корпуса как балки на упругом основании имеет вид:

$$EI \frac{d^4 w(z)}{dz^4} + k \cdot w(z) = q(z), \quad (6)$$

где  $EI$  – жесткость корпуса по отношению к изгибу;  $k$  – коэффициент жесткости упругого основания;  $q(z)$  – интенсивность внешней распределенной нагрузки. В рассматриваемом случае решение уравнения можно представить как  $w(z) = D_0 \cdot V_0(\alpha \cdot z) + D_1 \cdot V_1(\alpha \cdot z) + D_2 \cdot V_2(\alpha \cdot z) + D_3 \cdot V_3(\alpha \cdot z)$ , где  $D_0, D_1, D_2, D_3$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий;

$V_0(\alpha \cdot z), V_1(\alpha \cdot z), V_2(\alpha \cdot z), V_3(\alpha \cdot z)$  – функции Н. П. Пузыревского;  $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$

[11]. Из следующих граничных условий

$$\begin{cases} w'''(0) = \frac{P}{EI}, & \begin{cases} w'''(l) = 0, \\ w''(l) = 0; \end{cases} \\ w''(0) = \frac{M_a}{EI}; \end{cases} \quad (7)$$

определяются постоянные интегрирования:

$$D_3 = \frac{P}{2\sqrt{2}\alpha^3 EI}; \quad D_0 = D_2 \frac{V_3^2(u) + V_0(u)V_2(u)}{V_2^2(u) - V_1(u)V_3(u)} + D_3 \frac{V_0(u)V_3(u) - V_1(u)V_2(u)}{V_1(u)V_3(u) - V_2^2(u)};$$

$$D_2 = \frac{M_a}{2\alpha^2 EI}; \quad D_1 = D_2 \frac{V_0(u)V_1(u) + V_2(u)V_3(u)}{V_1(u)V_3(u) - V_2^2(u)} + D_3 \frac{V_1^2(u) - V_0(u)V_2(u)}{V_1(u)V_3(u) - V_2^2(u)}, \quad (8)$$

где  $u = \alpha \cdot l$ . После нахождения постоянных интегрирования изгибающий момент в корпусе судна может быть определен по выражению

$$M(z) = \frac{d^2 w(z)}{dz^2} \cdot EI. \quad (9)$$

Подставляя в уравнение изгибающих моментов конкретные значения, получим зависимости, представленные на рис. 6. Видно, что эпюра моментов имеет ярко выраженный экстремум, положение которого в основном



определяется величиной погруженной части корпуса (величина « $a$ »), а само экстремальное значение зависит от силы  $P$  и длины омываемого участка корпуса « $a$ ». Так, при  $a=20$  м и общей длине корпуса 170 м экстремум находится на расстоянии 45 м от носовой оконечности, а при  $a=42$  м экстремум находится на расстоянии 62 м.

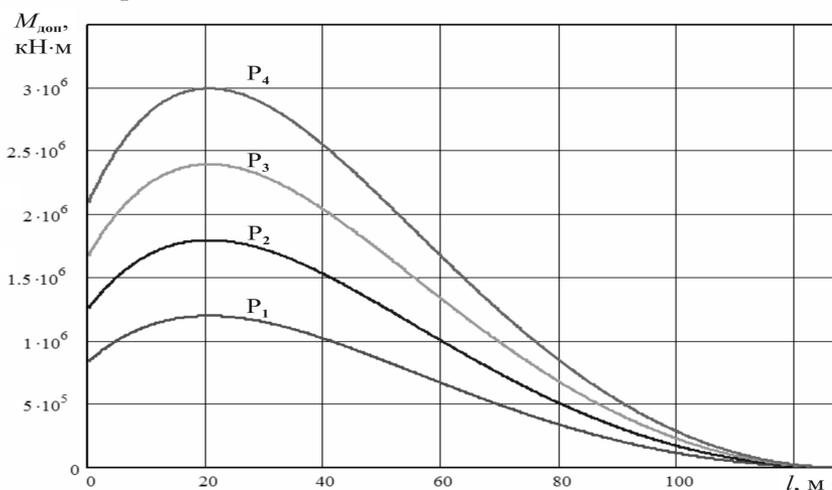


Рис. 6. Изменение дополнительного изгибающего момента

Как видно из рис. 6, величины дополнительных изгибающих моментов, полученных в результате «омывания» носовой оконечности судна, имеют достаточно большие значения и при определенных условиях могут достигать значений почти в 2 раза больших, чем гидростатический и изгибающий волновой момент, вместе взятые. Обращаем внимание, что знак дополнительного момента отличен от знака гидростатического и волнового момента, что приводит в конечном итоге к растяжению палубы, а в определенных условиях – и к ее разрушению. При больших давлениях  $P$  на палубу в носовой оконечности может наблюдаться случай выхода кормовой части судна из воды, что приведет к появлению второго экстремума в кормовой части судна. В таком случае возможен отрыв кормовой оконечности судна и одновременное разрушение корпуса на три части.

#### 4. Использование данных моделирования при построении алгоритма контроля ситуации методами современной теории катастроф

Интерпретация аварийной ситуации танкера «Находка» на основе динамической модели катастроф осуществляется в зависимости от степени неопределенности текущей ситуации. Формализация неопределенности основана на представлении ситуации в виде слабой, значительной и полной неопределенности. В условиях слабой и значительной неопределенности интерпретация динамики судна ведется на основе представления внешнего



возмущения в виде климатического спектра и описания динамики объекта с помощью модифицированного уравнения Матье [10]. Однако в условиях полной неопределенности приходится прибегать к формулировке гипотез и упрощающих предположений, что достигается с помощью синергетической парадигмы. Реализация синергетической парадигмы осуществлена на основе методов современной теории катастроф и фрактальной геометрии [10], [15]. При этом рассматривают два предельных случая эволюции судна как сложной динамической системы:

- движение судна к целевому аттрактору, формируемому в процессе выработки управляющих воздействий;
- потеря устойчивости (потеря прочности) в случае малой эффективности управления или невозможности его реализации в режиме реального времени.

Формально модель знаний при контроле прочности судна может быть представлена в виде структуры [12]:

$$M(\text{Fract-Know}) = \{F/Cat\}: J(X) \rightarrow J(Y), \quad (10)$$

где  $\{F/Cat\}$  – фрактальная структура, реализующая модель катастрофы;  $J(X)$ ,  $J(Y)$  – вход и выход модели.

Особенность рассматриваемой фрактальной структуры состоит в том, что ее формирование реализуется путем преобразования множества  $GZ(\theta, t)$ . Как следует из работы [12], область  $GZ(\theta, t)$  представляет собой интегрированную модель текущей ситуации. Эта модель отображает взаимное влияние двух компонент исследуемой математической модели: восстанавливающей  $M(\theta, t)$  и возмущающей  $M(t)$ . Причем изменение внешнего возмущения вызывает деформацию компоненты  $M(\theta, t)$ , на основе которой определяются нелинейные функции при периодической составляющей модифицированного уравнения Матье [10].

Оператор оценки истинности (адекватности) отображения модели катастроф с помощью фрактальной структуры имеет вид

$$J\{Cat(Know/X)\} \rightarrow J\{Cat(Know/Y)\}, \quad (11)$$

где  $JA\{Cat(Know/X)\}$ ,  $J\{Cat(Know/Y)\}$  – оператор, преобразующий элементы знания фрактальной структуры на входе и выходе системы знаний.

Многообразие результатов работы фрактальной структуры определяется как

$$\langle WF(a/X), F(b/Y), F(e/E) \rangle. \quad (12)$$

Здесь  $F(a/X)$ ,  $F(b/Y)$ ,  $F(e/E)$  – функции интерпретации, описывающие элементы знания на входе, выходе и при описании эволюции фрактальной структуры.

Эволюция фрактальной структуры (поле импульсов) в процессе развития текущей ситуации определяется в виде потока информации

$$\text{Imp}: J(e/E): \{J(x/X)\} \rightarrow \{J(y/Y)\}, \quad (13)$$

где  $J(e/E)$  – формальная система, задающая поток информации в модельно-параметрическом пространстве развития текущей ситуации.

Траектория, реализуемая преобразованием (13), представляет собой последовательность состояний динамической системы, смена которых осу-

ществляется в зависимости от уровня действующих возмущений и особенностей динамики объекта. Управление судном в процессе развития эволюции формируется на основе рекомендаций, вырабатываемых БИС на основе данных динамических измерений, интегрированной системы знаний и моделирования.

Соотношения (10) – (13) позволяют представить текущую ситуацию и управление БИС как преобразование:

$$\begin{aligned} Str(\tau/t): J\{Imp(x/X, y/Y, e/E)\} &\rightarrow J\{Out(x/X, y/Y, e/E)\}, \\ U: Imp(\tau/T) &\rightarrow Out\{\tau_0/T\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\tau_0/T$  – целевой аттрактор динамической системы, движение к которому формируется с помощью гипотез и упрощающих предположений в рамках синергетической парадигмы.

Фрактальная интерполяция при математическом описании текущей ситуации произведена на основе принципа сложности, обеспечивающего сжатие информации и представление эволюции сложной системы в виде простого и легко интерпретируемого геометрического образа. Выбор «регуляризатора» основан на принципе минимальной длины описания (Minimal Description Length или MDL) [21], формализующий известный принцип «бритвы Окама». Для набора исходных данных и множества моделей принцип MDL предпочитает модель с кратчайшим эффективным описанием, которая минимизирует сумму двух компонент: длины эффективного описания модели и длины эффективного описания данных, закодированных с помощью этой модели.

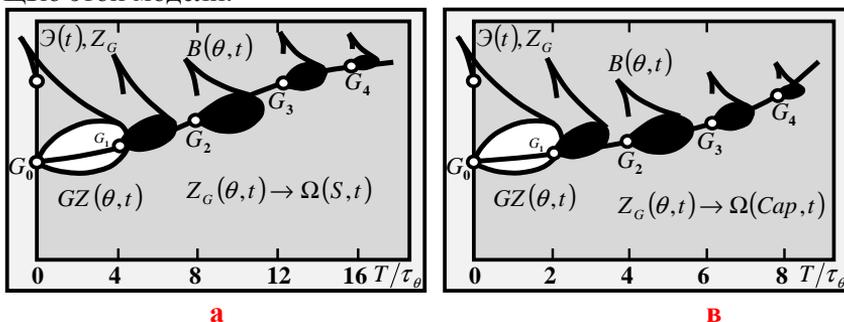


Рис.7. Эволюция динамической системы в условиях стабилизации ситуации (А) и при потере устойчивости движения (В)

На основе соотношения (14) реализуется алгоритм преобразования информации в рамках фрактальной геометрии. Алгоритм учитывает особенности динамической структуры катастрофы. Для повышения эффективности отображения текущей ситуации в сложных динамических средах геометрические образы фракталов дополняются структурами, реализуемыми на основе когнитивной парадигмы [4], [10]. В качестве иллюстрации на рис. 7 приведены два сценария развития текущей ситуации на основе фрактальной геометрии и соответствующая динамическая модель катастрофы.

Первый сценарий соответствует случаю стабилизации ситуации в процессе движения судна к целевому аттрактору (стабильное состояние систе-



мы), второй – потере устойчивости (возникновение катастрофы). На рисунках использованы следующие обозначения:  $t$  – время,  $\mathcal{E}(t)$  – энтропия процесса;  $ZG$  – аппликата центра тяжести (ЦТ) ДО;  $G_0, G_1, \dots, G_4$  – положения ЦТ;  $GZ(\theta, t)$  – область, интегрирующая динамическую среду с помощью фрактальной геометрии;  $\mathcal{Q}(St)$  и  $\mathcal{Q}(Cap)$  – области, отображающие стабилизацию ситуации и потерю устойчивости (опрокидывание).

Управленческие решения с помощью логической системы знаний привели к перестройке геометрической сцены в направлении движения к целевому аттрактору, который формируется путем последовательного преобразования информации на основе динамической базы знаний ИС.

При исследовании эволюции динамической системы на основе фрактальной геометрии теоретический и практический интерес представляет проблема выхода системы за предельные состояния, определяемые особенностями поведения судна при взаимодействии с внешней средой. Формальный аппарат переходов состояний динамической системы основан на представлении процесса в рамках нечеткого логического базиса. Алгоритм контроля динамики объекта реализуется с помощью функций принадлежности, определяемых системой нечеткой логики со свойством универсального аппроксиматора функций [9], [19].

Модель смены технических состояний в стохастических системах может быть описана полумарковским процессом. Для моделирования поведения во времени нечетких состояний может быть использован нечеткий аналог полумарковской цепи [2]. При этом «вложенная» цепь характеризует переходы между гипотезами, а моменты переходов определяются условием достижения прогнозом своих границ. Нечеткая последовательность переходов состояний  $H_{k-1}(j) \rightarrow H_k(i)$  описывается нечетким отношением  $F(H_k, H_{k-1})$ , заданным на множестве  $H_k \times H_{k-1}$  и отражающим априорные знания о возможных переходах состояний, определенных на основе предварительного анализа динамики текущей ситуации. Результаты анализа позволяют построить матрицу переходов  $\pi(H_k, H_{k-1})$  размерности  $(N+1) \times (N+1)$  с ФП  $\mu_{ij}(H_k, H_{k-1})$ , номера строк в которой соответствуют конечным состояниям, а столбцы – начальным. Для определения состояния в момент  $k$  используется правило [2]:

$$\langle \text{if } H_{k-1} = H_{k-1}(j), \text{ then } H_k = H_k^i(i) \rangle \quad (15)$$

с ФП  $\mu(H_k)$  в виде соотношения

$$\mu(H_k) = \sup T(x, y) \{ \mu(H_{k-1}), \mu(H_k, H_{k-1}) \}, \quad (16)$$

где  $T(x, y) = \min(x, y)$ .

Уточнение гипотез осуществляется по данным динамических измерений для  $H_k(i)$  с учетом данных предыдущего шага  $H_{k-1}(j)$ . Проверка выполняется в два этапа – прогноз гипотез от  $H_{k-1}(j)$  к  $H_{k,k-1}^i(i)$  и корректировка прогноза по измерениям при преобразовании  $H_{k,k-1}^i(i)$  к  $H_k(i)$ .

Диагностирование нарушений при исследовании эволюции динамической системы с помощью фрактальной геометрии производится на основе модели прогноза, построенной путем генерации альтернатив в рамках принципа конкуренции. Решение о наличии параметрических отказов на шаге  $k$  принимается при превышении ФП состояний  $S_k(0)$  и  $S_k(1)$  заданного уровня.



## Заклучение

Анализ аварийной ситуации танкера «Находка» позволил выяснить новые факты и закономерности динамики взаимодействия. Эти особенности не укладываются в рамки традиционных представлений о поведении судна на волнении как сложной динамической системы и требуют более обстоятельного анализа при выборе архитектуры судов подобного класса и необходимости оперативного контроля в условиях эксплуатации. Современный подход к созданию программных систем на основе интеллектуальных технологий и высокопроизводительных средств вычислений позволяет обеспечить адаптацию к изменениям в динамике системы в рамках концепции современной теории катастроф [10]. Реализация этой концепции открывает возможности приобретения дополнительной функциональности, позволяющей реагировать на изменения в поведении системы в сложной динамической среде. Такой подход к созданию бортового вычислительного комплекса основан на интеллектуальной парадигме управления и принципиальном ином представлении о функционировании ИС обеспечения безопасности мореплавания.

В основе информационного и экспериментального материала при функционировании ИС на основе методов теории катастроф лежит математический аппарат. Применение этого аппарата встречает большие сложности в трудноформализуемых задачах. В частности, в последние годы все чаще высказываются мнения, что понятие «точность» должно быть освобождено от догматического толкования, которое до сих пор используется в работах по исследованию сложных систем с помощью традиционного математического аппарата [8].

## Литература

1. Ашик В. В. Проектирование судов. – Л.: Судостроение, 1980.
2. Байхельд Ф. Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. – М.: Советское радио, 1988.
3. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982.
4. Бортовые интеллектуальные системы. Часть 2. Корабельные системы. – М.: Радиотехника, 2006.
5. Бронников А. А. Проектирование судов. – Л.: Судостроение, 1991.
6. Бураковский Е. П., Нечаев Ю. И., Бураковский П. Е., Прохнич В. П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф // Морской вестник. 2012..
7. Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И., Федяевский К. К. Гидромеханика. – Л.: Судостроение, 1982.
8. Клайн М. Математика. Утрата определенности. М.: Мир, 1985.
9. Лазарев В. Л. Эволюция систем контроля и управления с позиций информационно-энтропийной теории // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2005. Т.1. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С.33–41.



10. *Нечаев Ю. И.* Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011.
11. *Папкович П. Ф.* Труды по строительной механике корабля. В 4-х томах. – Л.: Судпромгиз, 1962. –Т.1.
12. Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов. – М.: Прогресс – Традиция, 2000.
13. Справочник по строительной механике корабля. В 3-х томах / Под ред. *О. М. Паляя*. – Л.: Судостроение, 1982.
14. Справочник по теории корабля. В трех томах / Под ред. *Я. И. Войткунского* – Л.: Судостроение, 1985.
15. *Федер Е.* Фракталы. – М.: Мир, 1991.
16. *Фоминых И. Б.* Интеграция логических и образных методов отражения информации в системах искусственного интеллекта // Новости искусственного интеллекта. 1998. №3. С.76–86.
17. *Худяков Л. Ю.* Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение. 1980.
18. *Шмырев А. Н., Холодilin А. Н.* Мореходность и стабилизация судов на волнении. – Л.: Судостроение, 1976.
19. *Buckley Tork.* The Axe Factor. Damen & Amels take a bow // The Yacht Report, issue 111, march 2010. – P. 46–52.
20. *Iwao Watanabe, Hidecimi Ontsubo.* Analysis of the accident of the MV Nakhodka. Part 1. Estimation of wave loads // Marine Science and technology. Vol.3. No 4. Springer. 1998. – P. 171–180.
21. *Judd K., Mees A.* On Selecting Models for Nonlinear Time Series // Physica D. 82: 426–444. 1995.
22. *Keuning J.A., Pinkster J., F. van Walree.* Further Investigation into the Hydrodynamic Performance of the AXE Bow Concept, HSMV 2002, Naples, Italy, 2002.
23. *Tetsuya Yao, Yoichi Sumi, Hiroyasu Atsushi Kumano, Hidetoshi Sueoka, Hideami Ontsubo.* Analysis of the accident of the MV Nakhodka. Part 2. Estimation of the structural strength // Marine Science and technology. Vol.3. No 4. Springer. 1998. – P.181–193.
24. *Zadeh L.* Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM-1994. Vol.37. № 3. P. 77–84.