**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ 2015 Т. 7 № 2 С. 281−288**

Ки&М

МОДЕЛИ В ФИЗИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 51.76 : 504.4.054

Метод принуждения в играх Гермейера при моделировании трехуровневой системы управления судовыми балластными водами

Г. А. Угольницкий[a], А. Б. Усов, А. И. Рыжкин

Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук
им. И. И. Воровича,
Россия, 344090, г. Ростов н/Д, ул. Мильчакова, д. 8а

E-mail: [a] ougoln@mail.ru

Получено 22 января 2015 г.

Построена статическая трехуровневая теоретико-игровая модель системы управления судовыми балластными водами. Используются методы иерархического управления при одновременном учете условий поддержания экологической системы в заданном состоянии. Проводится сравнение результатов исследования модели с точки зрения игр Гермейера Γ_1 и Γ_2. Приведены примеры численных расчетов в ряде характерных случаев.

Ключевые слова: иерархическая система управления, водяной балласт, принуждение, игры Гермейера, имитация

The compulsion method in the Germeyer’s games at modeling three-level control system of the ship’s ballast water

G. A. Ougolnitsky, **A. B. Usov, A. I. Ryzhkin**

*Southern Federal University, I. I. Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer science,
8a, Milchakov st., Rostov-on-Don, 344090, Russia*

Abstract. — The static three-level game-theoretic model of a control system of the ship’s water ballast is built. The methods of hierarchical control in view of requirements of keeping the system in the given state are used. A comparison of the results of study of the model in terms of Γ_1 and Γ_2 Germeyer’s games is conducted. Numerical calculations for some typical cases are given.

Keywords: hierarchical control system, water ballast, compulsion, Germeyer’s games, simulation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 281–288 (Russian).

Работа выполнена при поддержке Южного федерального университета, проект № 213.01-07–2014/07ПЧВГ.

Введение

Качество балластных вод оказывает существенное влияние на состояние речных и морских вод в акватории порта. Сброс большого количества загрязненных балластных вод может привести к существенному ухудшению состояния акватории порта. В России до сих пор не установлены стандарты, позволяющие реализовать эффективный экологический контроль качества сбрасываемых балластных вод. Проводимых в этом направлении математических исследований явно недостаточно. Ниже исследование данной проблемы проводится на основе иерархического теоретико-игрового подхода.

Все современные системы управления, в том числе и системы управления портом, являются многоуровневыми системами, отношения внутри которых построены на основе иерархии. Имеются субъекты управления верхнего, среднего и нижнего уровня, отношения между которыми строятся по принципу «начальник – подчиненный». Наличие нескольких субъектов с несовпадающими интересами, целеустремленно воздействующих на управляемую систему, приводит к теоретико-игровым постановкам задачи управления.

Математические основы принятия решений в иерархических системах заложены в теории контрактов [Laffont, Martimort, 2002], информационной теории иерархических систем [Горелик, Горелов, Кононенко, 1991], теории активных систем [Губко, Новиков, 2002] и ряде других работ [Петросян, Ширяев, 1986]. При моделировании даже в стационарном случае, следуя [Угольницкий, 2010], необходимо принимать во внимание объективные требования к состоянию управляемой системы.

Ниже исследуется статическая трехуровневая теоретико-игровая модель системы контроля водяного балласта судов. В системе предполагается применение методов иерархического управления при одновременном учете условий поддержания системы в заданном состоянии.

Система управления водяным балластом судов включает в себя:

- источник воздействия верхнего уровня (Федеральный центр, ФЦ);
- источник воздействия среднего уровня (начальник порта, НП);
- источник воздействия нижнего уровня (капитан судна, КС);
- управляемую систему (акватория порта, УС).

Взаимоотношения внутри моделируемой системы устроены следующим образом: ФЦ воздействует на НП, НП воздействует на КС, КС — на УС. ФЦ, НП и КС вместе можно рассматривать как совокупный источник воздействия на УС, имеющий иерархическую структуру. Воздействуя на УС, КС преследует свои эгоистические цели, которые, вообще говоря, не совпадают с объективно существующими целями поддержания УС в заданном состоянии. Нужен ФЦ, который, применяя различные методы управления иерархической системой, способен обеспечить поддержание УС в заданном состоянии. В [Угольницкий, Усов, Рыжкин, 2014] исследован случай побуждения, в настоящей статье — принуждения.

Математическая постановка задачи

В порт прибывают речные и морские суда, перевозящие различные грузы. При загрузке судна в порту в акваторию сбрасываются балластные воды, содержащие загрязняющие вещества (ЗВ). Целью КС является максимизация прибыли, полученной от фрахта, за вычетом переменных издержек. Как следствие, КС экономически не заинтересован в очистке водяного балласта своего судна. НП воздействует на область допустимых управлений КС, т. е. ограничивает максимально допустимую массу перевозимого судном груза и стремится к максимизации поступающих к нему от КС средств. ФЦ должен поддерживать УС в заданном состоянии, он ограничивает область допустимых управлений НП. Считается, что система находится в заданном состоянии, если выполнены стандарты качества морской воды, т. е. наблюдается не превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) ЗВ в акватории порта.

Интересы ФЦ и НП, вообще говоря, различны. ФЦ должен создать условия, при которых поддержание речной системы в заданном состоянии будет экономически выгодно для НП. Добиться этого ФЦ может не единственным способом, поэтому, кроме того, он стремится к максимизации своего дохода.

Целевая функция ФЦ имеет вид

$$J_{\text{ФЦ}} = \alpha V(m)\, p \to \max. \tag{1}$$

Здесь m — масса перевозимого груза; $V(m)$ — объем балластных вод, сбрасываемых в акваторию порта, зависящий от массы перевозимого судном груза m; $p = \text{const}$ — размер платы в порту за единицу сброшенного балласта; $V(m)p$ — плата за сброс водяного балласта объема $V(m)$; $\alpha = \text{const}$ — доля отчислений от платы за сброс водяного балласта в федеральный бюджет. ФЦ управляет величиной $M_{\text{ФЦ}}$, которая ограничивает область допустимых управлений НП.

Целевая функция НП имеет вид

$$J_{\text{НП}} = (1-\alpha)V(m)\, p - F_{\text{с}}(V(m)) \to \max. \tag{2}$$

Здесь $F_{\text{с}}(V(m))$ — расходы на очистку акватории порта от загрязняющих веществ, зависящие от объема водяного балласта. Функция $F_{\text{с}}(V(m))$ — возрастающая функция своих аргументов. НП управляет величиной $M_{\text{НП}}$, которая ограничивает область допустимых управлений КС.

Целевая функция КС имеет вид:

$$J_{\text{КС}} = F_{\text{ф}}(m) - V(m)\, p \;\; - T_{\text{о}}(m) \to \max\,. \tag{3}$$

Здесь $F_{\text{ф}}(m)$ — функция платы владельцу судна за перевозку груза массы m; $T_{\text{о}}(m)$ — операционные расходы капитана судна, зависящие от массы груза, т. е. расходы, связанные с проведением производственно-хозяйственных и финансовых операций на судне, а также отчисления на ремонт и техобслуживание. Функции $F_{\text{ф}}(m)$, $T_{\text{о}}(m)$ — возрастающие функции своих аргументов; КС управляет массой перевозимого груза.

Задача решается при следующих ограничениях на управления:

– КС

$$M_{\min} \le m \le M_{\text{НП}}\,; \tag{4}$$

– НП

$$M_{\min} \le M_{\text{НП}} \le M_{\text{ФЦ}}\,; \tag{5}$$

– ФЦ

$$M_{\min} \le M_{\text{ФЦ}} \le M_{\max}. \tag{6}$$

Здесь $M_{\min}$, $M_{\max}$ — минимально и максимально допустимые грузоподъемности судна ($M_{\min}$, $M_{\max} = \text{const}$).

Пусть для поддержания УС в заданном состоянии достаточно, чтобы в акватории порта не были превышены ПДК ЗВ, определяемые государственными нормативными актами, например, [Приказ Росрыболовства № 20, 2010], т. е.

$$B \le B_{\max}\,;\; B_{\max} = \text{const}, \tag{7}$$

где B есть концентрация ЗВ в акватории порта; $B_{\max}$ — максимально допустимая концентрация ЗВ в акватории порта.

Пусть

$$B = B_0 + V(m)\, W/A; \qquad (8)$$
$$A,\ B_0,\ W = \text{const},$$

где W — количество ЗВ, содержащегося в единице сбрасываемого балласта; A — объем внутренних портовых вод; B_0 — некоторая постоянная.

Таким образом, решается трехуровневая модель (1)–(8), представляющая собой нелинейную задачу условной оптимизации, решаемую с учетом иерархии в отношениях между субъектами управления. В качестве метода иерархического управления в модели (1)–(8) используется метод принуждения [Угольницкий, 2010], при котором в каждой паре субъектов управления (ФЦ и НП, НП и КС) субъект более высокого уровня (Ведущий) заставляет субъекта более низкого уровня (Ведомого) способствовать достижению своих целей, не принимая во внимание его цели и интересы.

Метод принуждения предполагает воздействие Ведущего на множество допустимых управлений Ведомого. При этом Ведущий сужает его таким образом, что у Ведомого не остается возможности выбора стратегий поведения, не обеспечивающих поддержания системы в заданном состоянии. Воздействие Ведущего носит административно-законодательный характер. Принуждение реализуемо лишь в случае, когда Ведущий располагает значительными возможностями административного влияния на Ведомого.

Предполагается, что в системе реализуются информационные регламенты игр Гермейера Γ_1 и Γ_2 [Горелик и др., 1991] с учетом требований поддержания системы в заданном состоянии.

Возможны следующие комбинации равновесий в играх Гермейера Γ_1 и Γ_2 между субъектами управления различных уровней в модели (1)–(8):

1) для ФЦ и НП строится равновесие в игре Гермейера Γ_1, а для НП и КС — в игре Γ_2;
2) для ФЦ и НП — равновесие в игре Гермейера Γ_2, для НП и КС — в игре Γ_1;
3) для обеих пар субъектов управления строится равновесие в игре Гермейера Γ_2;
4) для обеих пар субъектов — равновесие в игре Гермейера Γ_1.

Алгоритмы решения игр Гермейера в динамическом случае приведены в [Угольницкий, Усов, 2014]. Ниже приведена модификация этих алгоритмов в статическом случае для модели (1)–(8).

Алгоритм нахождения равновесия в игре Гермейера Γ_1 (для ФЦ и НП) и Γ_2 (для НП и КС) в модели (1)–(8) состоит в следующем.

1. Решается игра Гермейера Γ_2 для НП и КС. Находится величина L_2 – значение выигрыша КС с учетом (4), (5), если он отказывается сотрудничать с НП:

$$L_2 = \sup_m \inf_{M_{\text{НП}}} J_{\text{КС}}.$$

Стратегии НП и КС, реализующие величину L_2, обозначим $M_{\text{НП}}{}^{\text{К}}, m^{\text{К}}$.

2. Решается задача условной оптимизации (2), (4), (5) с дополнительным условием $L_2 < J_{\text{КС}}$. Максимум (2) ищется сразу по двум параметрам — $M_{\text{НП}}$, m. Стратегии, доставляющие максимум, параметрически зависят от $M_{\text{ФЦ}}$. Обозначим их $M_{\text{НП}}{}^S(M_{\text{ФЦ}}), m^S(M_{\text{ФЦ}})$.

Для НП оптимальные с точки зрения игры Γ_2 стратегии определяются формулой

$$\left(M_{\text{НП}}{}^*(M_{\text{ФЦ}}), m^*(M_{\text{НП}}{}^*(M_{\text{ФЦ}}))\right) = \begin{cases} \left(M_{\text{НП}}{}^{\text{К}}, m^{\text{К}}\right), & \text{если } m \ne m^S; \\ \left(M_{\text{НП}}{}^S(M_{\text{ФЦ}}), m^S(M_{\text{ФЦ}})\right), & \text{если } m = m^S(M_{\text{ФЦ}}). \end{cases}$$

При экономически разумном КС получим, что $\left(M_{\text{НП}}{}^{*}(M_{\text{ФЦ}}), m^{*}(M_{\text{ФЦ}})\right) = \left(M_{\text{НП}}{}^{S}(M_{\text{ФЦ}}), m^{S}(M_{\text{ФЦ}})\right)$.

3. Определенные на шаге 2 оптимальные стратегии НП и КС — величины $M_{\text{НП}}{}^{S}(M_{\text{ФЦ}}), m^{S}(M_{\text{ФЦ}})$ подставляются в (1), (8). Проводится максимизация целевой функции (1) с учетом (6), (8) по $M_{\text{ФЦ}}$. Величину, являющуюся решением этой задачи, обозначим $M_{\text{ФЦ}}{}^{*}$.

4. Равновесие в игре Γ_1 (для ФЦ и НП) и Γ_2 (для НП и КС) имеет вид

$$(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}, M_{\text{НП}}{}^{*}, m^{*}) = \left(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}, M_{\text{НП}}{}^{S}(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}), m^{S}(M_{\text{НП}}{}^{S}(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}))\right).$$

Алгоритм нахождения равновесия в игре Гермейера Γ_2 (для ФЦ и НП) и Γ_1 (для НП и КС) состоит в следующем.

1. Решается параметрическая задача условной оптимизации (3), (4). Определяются оптимальные стратегии КС в зависимости от стратегий НП, т. е. величины $m^{*}(M_{\text{НП}})$.

2. Величины $m^{*}(M_{\text{НП}})$, найденные на первом шаге алгоритма, подставляются в (2), (8).

3. Решается игра Γ_2 для ФЦ и НП. Находится величина L_2 — значение выигрыша НП с учетом (5), (6), если он отказывается сотрудничать с ФЦ:

$$L_2 = \sup_{M_{\text{НП}}} \inf_{M_{\text{ФЦ}}} J_{\text{НП}}.$$

Стратегии ФЦ и НП, реализующие величину L_2, обозначим $M_{\text{ФЦ}}{}^{\text{К}}, M_{\text{НП}}{}^{\text{К}}$.

4. Решается задача условной оптимизации (1), (6)–(8) с дополнительным условием $L_2 < J_{НП}$. Максимум (1) ищется сразу по двум параметрам — $M_{НП}$ и $M_{ФЦ}$, оптимальные стратегии обозначим $M_{ФЦ}{}^{S}, M_{НП}{}^{S}$.

5. Равновесие в игре Гермейера Γ_2 (для ФЦ и НП) и Γ_1 (для НП и КС) имеет вид

$$(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}, M_{\text{НП}}{}^{*}(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}), m^{*}(M_{\text{НП}}{}^{*}(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}))) = \begin{cases} \left(M_{\text{ФЦ}}{}^{\text{К}}, M_{\text{НП}}{}^{\text{К}}, m^{*}(M_{\text{НП}}{}^{\text{К}})\right), \text{ если } M_{\text{НП}} \neq M_{\text{НП}}{}^{S}; \\ \left(M_{\text{ФЦ}}{}^{S}, M_{\text{НП}}{}^{S}, m^{*}(M_{\text{НП}}{}^{S})\right), \text{ если } M_{\text{НП}} = M_{\text{НП}}{}^{S}. \end{cases}$$

При экономически разумном НП получим, что $(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}, M_{\text{НП}}{}^{*}, m^{*}) = \left(M_{\text{ФЦ}}{}^{S}, M_{\text{НП}}{}^{S}, m^{*}(M_{\text{НП}}{}^{S})\right)$.

Алгоритм нахождения равновесия в игре Гермейера Γ_2 как для ФЦ и НП, так и НП и КС:

1. Решается игра Гермейера Γ_2 для ФЦ и НП. Находится величина $(L_2)_S$ — значение выигрыша НП с учетом (4)–(6), если он отказывается сотрудничать с ФЦ:

$$(L_2)_S = \sup_{m, M_{\text{НП}}} \inf_{M_{\text{ФЦ}}} J_{\text{НП}}.$$

Стратегии, реализующие величину $(L_2)_S$, обозначим $M_{\text{ФЦ}}{}^{\text{К}}, M_{\text{НП}}{}^{\text{К}}, m^{\text{К}}$.

2. Решается задача условной оптимизации (1), (6), (8) с дополнительным условием $(L_2)_S < J_{\text{НП}}$.

Максимум (1) ищется по трем параметрам — $M_{\text{ФЦ}}, M_{\text{НП}}, m$. Оптимальные стратегии обозначим $M_{\text{ФЦ}}{}^{S}, M_{\text{НП}}{}^{S}, m^{S}$..

3. При экономически разумных КС и НП равновесие в игре Гермейера Γ_2 как для ФЦ и НП, так и НП и КС: $\left(M_{\text{ФЦ}}{}^{*}, M_{\text{НП}}{}^{*}, m^{*}\right) = \left(M_{ФЦ}{}^{S}, M_{НП}{}^{S}, m^{S}\right)$.

Алгоритм нахождения равновесия в игре Гермейера Γ_1, как для ФЦ и НП, так и НП и КС.

1. Решается параметрическая задача условной оптимизации (3), (4). Определяются оптимальные стратегии КС в зависимости от стратегий НП, т. е. величины $m^*(M_{\text{НП}})$.

2. Величины $m^*(M_{\text{НП}})$, найденные на первом шаге алгоритма, подставляются в (2), (8).

3. Решается задача условной оптимизации (2), (5). Определяются оптимальные управления НП в зависимости от стратегий ФЦ, т. е. величины $M_{\text{НП}}{}^*(M_{\text{ФЦ}})$.

4. Найденные на предыдущем шаге величины $M_{\text{НП}}{}^*(M_{\text{ФЦ}})$ подставляются в (1).

5. Решается задача условной оптимизации (1), (6)–(8). Находятся оптимальные управления ФЦ, позволяющие поддерживать систему в заданном состоянии (7), (8).

6. Равновесие с учетом требования поддержания системы (1)–(8) в заданном состоянии при побуждении имеет вид $(M_{\text{ФЦ}}{}^*, M_{\text{НП}}{}^*(M_{\text{ФЦ}}{}^*), m^*(M_{\text{НП}}{}^*(M_{\text{ФЦ}}{}^*)))$.

В случае входных функций частного вида сформулированные в алгоритмах оптимизационные задачи решаются методом множителей Лагранжа. В общем случае модель (1)–(8) исследуется путем имитации и прямого упорядоченного перебора областей допустимых управлений субъектов управления [Лесин, Лисовец, 1998].

Примеры расчетов

Приведем результаты нескольких модельных расчетов по предложенной модели (1)–(8). Входные данные для примеров были взяты из [Винников, 2001; Винников, 2010; Иванов, 2009].

Пример 1. Пусть входные функции модели (1)–(8) имеют следующий вид: $V(m) = C_1 m$; $F_{\text{с}}(V(m)) = C_{\text{с}}V(m)$; $F_{\text{ф}}(m) = C_{\Phi}m^{\eta}$; $T_{\text{о}}(m) = C_{\text{о}}m$, где C_1, $C_{\text{с}}$, C_{Φ}, η, $C_{\text{о.}} = \text{const}$; $C_{\text{с}}$ — стоимость очистки единицы объема сбрасываемых балластных вод; C_{Φ} — плата владельцу судна за перевозку единицы груза (ставка фрахта); $C_{\text{о}}$ — операционные расходы.

Численные расчеты проводились методом прямого упорядоченного перебора на основе методологии имитационного моделирования в случае (у.е. — стоимость в условных единицах; м — метр; т — тонна; мг — миллиграмм) α = 0.5; р = 3.5 у.е./м^3; C_1 = 1 м^3/т; $C_{\text{с}}$ = 2 у.е./м^3; C_{Φ} = 170 у.е./т; η = 0.85; $C_{\text{о.}}$ = 4.17 у.е./т; $M_{\min}$ = 10000 т; $M_{\max}$ = 90000 т; $B_{\max}$ = 50 мг/м^3; B_0 = 20 мг/м^3; W = 50 мг/м^3; А = 10^7 м^3.

В этом случае:

для игры $\Gamma_1 - \Gamma_1$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 27000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 27000 т; m^* = 27000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = 6863 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 243000 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 38250 у.е.;

для игры $\Gamma_1 - \Gamma_2$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 11000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 11000 т; m^* = 11000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –211445 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 247000 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 10250 у.е.;

для игр $\Gamma_2 - \Gamma_1$ и $\Gamma_2 - \Gamma_2$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 10000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 10000 т; m^* = 10000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –227979 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 247250 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 8500 у.е.

Пример 2. В случае входных данных примера 1 и α = 0.5; р = 1.5 у.е./м^3; C_{Φ} = 100 у.е./т получим:

для игры $\Gamma_1 - \Gamma_1$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 59000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 59000 т; m^* = 59000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = 2407 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 266000 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 35250 у.е.;

в остальных случаях: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 10000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 10000 т; m^* = 10000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –322911 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 32725 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = –1500 у.е.

Пример 3. В случае входных данных примера 1 и α = 1; p = 3 у.е./м^3; $C_Ф$ = 2800 у.е./т; η = 0.6 получим:

для игры $\Gamma_1-\Gamma_2$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 11000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 11000 т; m^* = 11000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = 75721у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 223685 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 24000 у.е.;

в остальных случаях: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 10000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 10000 т; m^* = 10000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = 53328 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 225685 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 21000 у.е.

Пример 4. В случае входных данных примера 3 и α = 0.1; p = 6 у.е./м^3; C_c = 4 у.е./м^3; $C_Ф$ = 1600 у.е./т получим:

для игры $\Gamma_1-\Gamma_1$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 90000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 90000 т; m^* = 10000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –460000 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 36667 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = –9000 у.е.;

для игры $\Gamma_1-\Gamma_2$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 54000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 54000 т; m^* = 54000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –213646.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 112267 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 23400 у.е.;

для игры $\Gamma_2-\Gamma_1$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 10000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 10000 т; m^* = 10000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –389915 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 162667 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = 45000 у.е.;

для игры $\Gamma_2-\Gamma_2$: $M^*_{\text{ФЦ}}$ = 90000 т; $M^*_{\text{НП}}$ = 90000 т; m^* = 90000 т; $J^*_{\text{КС}}$ = –217198 у.е.; $J^*_{\text{НП}}$ = 50667 у.е.; $J^*_{\text{ФЦ}}$ = –3000 у.е.

В примерах 1–4 концентрация ЗВ в акватории порта не превышает предельно допустимых концентраций, стандарты качества (7) выполняются.

Заключение

В статье предложены алгоритмы решения игр Гермейера Γ_1 и Γ_2 для статической модели в случае трех субъектов управления. Предложенный механизм исследования статической трехуровневой теоретико-игровой модели системы контроля водяного балласта судов, основанный на комбинации равновесий в играх Гермейера Γ_1 и Γ_2, позволяет сделать следующие выводы.

1. Деятельность ФЦ может быть убыточна как в случае низкой платы за сброс единицы балластных вод КС (пример 2: регламенты $\Gamma_1-\Gamma_2$, $\Gamma_2-\Gamma_1$, $\Gamma_2-\Gamma_2$), так и в случае недостаточных отчислений от платы за сброс водяного балласта в федеральный бюджет (пример 4: регламент $\Gamma_2-\Gamma_2$).
2. В примере 2 (регламенты $\Gamma_2-\Gamma_1$, $\Gamma_2-\Gamma_2$) ФЦ не имеет достаточных экономических рычагов воздействия на НП для выполнения условий сотрудничества, поэтому НП принимает решение не сотрудничать с ФЦ, деятельность КС становится убыточной.
3. Ведение своей деятельности для КС может быть экономически не выгодно даже в случае сотрудничества с НП (примеры 2–4: регламенты $\Gamma_1-\Gamma_2$, $\Gamma_2-\Gamma_2$).
4. Деятельность НП приносит прибыль как при низком размере платы за сброс балластных вод (пример 2), так и при максимальном размере отчислений в федеральный бюджет (пример 3).

Авторы благодарят сотрудников Южного УГМРН Ространснадзора за обсуждение предложенных математических моделей.

Список литературы

Винников В. В. Системы технологий на морском транспорте (перевозка и перегрузка) / В. В. Винников, Е. Д. Крушкин, Е. Д. Быкова; под общ. ред. В. В. Винникова. — О.: Фенікс; М.: ТрансЛит, 2010. — 576 с.

Винников В. В. Экономика предприятия морского транспорта (экономика морских перевозок). — Одесса: Латстар, 2001. — 416 с.

Горелик В. А., Горелов М. А., Кононенко А. Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. — М.: Радио и связь, 1991.

Губко М. В., Новиков Д. А. Теория игр в управлении организационными системами. — М.: Синтез, 2002.

Иванов С. Е. Морская индустрия и глобальный кризис — наблюдения судоброкера. — URL: http://www.korabel.ru/news/comments/morskaya_industriya_i_globalniy_krizis_-_nablyudeniya_sudobrokera.html (дата обращения: 11.12.2013).

Лесин В. В., Лисовец Ю. П. Основы методов оптимизации. — М.: МАИ, 1998. — 344 с.

Петросян Л. А., Ширяев В. Д. Иерархические игры. — Изд-во Морд. ун-та, 1986.

Приказ Росрыболовства № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» от 18.01.2010.

Угольницкий Г. А. Иерархическое управление устойчивым развитием. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. — 336 с.

Угольницкий Г. А., Усов А. Б. Равновесия иерархически организованных динамических систем управления с учетом требования устойчивого развития // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 1.

Угольницкий Г. А., Усов А. Б., Рыжкин А. И. Метод побуждения в играх Гермейера при моделировании трехуровневой системы управления судовыми балластными водами // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 4. — С. 535–542.

Laffont J.-J., Martimort D. The Theory of Incentives. — Princeton Univ. Press, 2002.