

УДК 51.76 : 504.4.054

УПРАВЛЕНИЕ ВОДЯНЫМ БАЛЛАСТОМ СУДОВ

© 2012 г. А.И. Рыжкин, А.Б. Усов

Рыжкин Артур Игоревич – студент, кафедра прикладной математики и программирования, факультет математики, механики и компьютерных наук, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: veronik@aaanet.ru.

Ryzhkin Arthur Igorevich – Student, Department of Applied Mathematics and Programming, Faculty of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, e-mail: veronik@aaanet.ru.

Усов Анатолий Борисович – доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной математики и программирования, факультет математики, механики и компьютерных наук, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: usov@math.sfedu.ru.

Usov Anatoliy Borisovich – Doctor of Technical Science, Professor, Department of Applied Mathematics and Programming, Faculty of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences, Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, e-mail: usov@math.sfedu.ru.

Построена математическая иерархическая двухуровневая модель управления водяным балластом судов. Указаны алгоритмы построения равновесия по Штакельбергу с учетом требования поддержания системы в гомеостазе. В качестве метода иерархического управления используется метод побуждения. Приведены примеры численных расчетов в ряде характерных случаев.

Ключевые слова: иерархическая система управления, водяной балласт, побуждение, равновесие по Штакельбергу, гомеостаз, имитация.

The mathematical hierarchical two-level model of steamship water ballast control is built. The specified algorithms of the building of the Stackelberg equilibrium with requirements of the homeostasis are indicated. The method of hierarchical control compulsion is used. The numerical calculations in some typical cases are given.

Keywords: hierarchical control system, water ballast, compulsion, Stackelberg equilibrium, homeostasis, imitation.

Всемирное судоходство перевозит свыше 80 % мировых грузов. При этом судами перемещается огромное количество водяного балласта, необходимо для безопасной и эффективной эксплуатации. Неконтролируемый сброс водяного балласта представляет серьезную угрозу экологии океанов, морей, рек. С 80-х гг. XIX в. в качестве балласта начала использоваться забортная вода. Вместе с водой в балластные танки судов поступают различные загрязняющие вещества (ЗВ). Проблема контроля качества и количества водяного балласта судов является в настоящее время одной из важнейших экологических проблем. Её

решение требует комплексного, системного подхода, предполагающего широкое использование современных информационных технологий, построение и исследование математических моделей систем контроля и управления качеством и количеством водяного балласта судов [1–5].

Исследование проблемы проводится на основе теоретико-игрового и иерархического подходов с учетом требований как экономического развития, так и экологического равновесия на длительном интервале времени; необходимости иерархического управления устойчивым развитием.

Исследуем двухуровневую иерархически управляемую систему контроля качества балластных вод, включающую в себя источник воздействия верхнего уровня (Ведущий – начальник порта), нижнего (Ведомый – капитан судна), управляемую систему (УС – акватория порта) [6].

Предполагается, что принята следующая совокупность правил поведения и информированности различных субъектов управления: Ведущий выбирает свою стратегию поведения первым (делает ход первым) и сообщает ее Ведомому; при этом он максимизирует свою целевую функцию на множестве тех стратегий, которые позволяют поддерживать УС в устойчивом состоянии. Предполагается, что ему известна целевая функция Ведомого; Ведомый выбирает свою стратегию, когда выбор Ведущего известен; он стремится к достижению только своих целей, не обращая внимания на состояние УС.

Взаимоотношения внутри моделируемой системы устроены следующим образом: Ведущий воздействует на Ведомого, Ведомый – на УС. Ведущего и Ведомого вместе можно рассматривать как совокупный источник воздействия на УС, имеющий иерархическую структуру. Воздействуя на УС, Ведомый преследует свои эгоистические цели (например, получение максимальной прибыли), не совпадающие с объективно существующими целями поддержания УС в гомеостазе. Нужен Ведущий, который, воздействуя на Ведомого и УС, способен обеспечить поддержание УС в гомеостазе.

Математическая постановка задачи

Проведем моделирование деятельности морского порта с точки зрения контроля качества воды в его акватории. В порт прибывают речные и морские суда, перевозящие различные грузы. Судами используется топливо двух марок – IFO180 и MGO. При загрузке судна в порту в акваторию сбрасываются балластные воды. Цель капитана судна – максимизация прибыли, полученной от фрахта за вычетом переменных издержек. Как следствие, капитан экономически не заинтересован в очистке водяного балласта своего судна.

Сброс неочищенного водяного балласта ухудшает состояние водной среды. Начальник порта взимает с судов плату за сброс балластных вод, накапливает поступающие средства в централизованном фонде, откуда потом они выделяются на проведение различных очистных мероприятий в акватории порта.

Главной целью начальника порта является поддержание качества воды в акватории порта в установленных государством рамках. Считается, что УС находится в гомеостазе (устойчивом состоянии), если выполнены стандарты качества речной (морской) воды, т.е. не превышены предельно допустимые концентрации (ПДК) ЗВ в акватории порта. Добиться этого можно разными способами, поэтому, кроме того, он стремится к максимизации своего дохода. Его целевая функция имеет вид

$$J_{\text{порт}}(KN) = C_{\text{порт.расх}} + V(m)KN - F_{\text{надзор}}(KN) - F_{\text{очистка}}(V(m)) \rightarrow \max_{KN} \quad (1)$$

Здесь $C_{\text{порт.расх}} = \text{const}$ – портовые сборы с судна, направленные на покрытие расходов на содержание порта и его акватории, они включают в себя корабельный, лоцманский, маячный, навигационный и экологический сборы; $V(m)$ – объем балластных вод, сбрасываемых в акваторию порта, зависящий от массы перевозимого судном груза m ; KN – размер платы порту за единицу сброшенного балласта; $F_{\text{надзор}}(KN)$ – расходы на оплату надзорных за судами органов, зависящие от размера платы порту за единицу сброшенного балласта; $F_{\text{очистка}}(V(m))$ – расходы на очистку акватории порта от загрязняющих веществ, зависящие от объема водяного балласта.

Целевая функция капитана судна имеет вид

$$J_{\text{судно}}(m) = F_{\text{фрахт}}(m) - C_{\text{порт.расх}} - V(m)KN - T_{\text{IFO}}(m) - T_{\text{MGO}}(m) - T_{\text{опер.расх}}(m) - T_{\text{тех.обсл}}(m) - C_{\text{страх}} \rightarrow \max_m \quad (2)$$

Здесь $F_{\text{фрахт}}(m)$ – функция платы владельцу судна за перевозку груза массой m ; $T_{\text{IFO}}(m)$, $T_{\text{MGO}}(m)$ – затраты судна на топливо марок IFO180 и MGO соответственно; $T_{\text{опер.расх}}(m)$ – операционные расходы капитана судна, зависящие от массы груза, т.е. расходы, связанные с проведением производственно-хозяйственных и финансовых операций на судне; $T_{\text{тех.обсл}}(m)$ – отчисления на ремонт и техобслуживание, зависящие от массы груза; $C_{\text{страх}} = \text{const}$ – расходы на страхование судна и груза.

Задача решается при следующих ограничениях на управление:

$$M_{\min} \leq m \leq M_{\max}; \quad M_{\min}, M_{\max} = \text{const}; \quad (3)$$

$$KN_{\min} \leq KN \leq KN_{\max}; \quad KN_{\min}, KN_{\max} = \text{const}, \quad (4)$$

где $M_{\min}$, $M_{\max}$ – минимально и максимально допустимые грузоподъемности судна; $KN_{\min}$, $KN_{\max}$ – минимально и минимально разрешенная плата порту за единицу сброшенного балласта в его акватории.

Пусть для поддержания УС в гомеостазе достаточно, чтобы в акватории порта не были превышены ПДК ЗВ, определяемые государственными нормативными актами, например, [7], т.е.

$$B \leq B_{\max}; \quad B_{\max} = \text{const}, \quad (5)$$

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

Пусть

$$B = B_0 + V(m)W/A; \quad A, B_0, W = \text{const}, \quad (6)$$

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

В дальнейшем решается оптимизационная задача (1) – (6), представляющая собой нелинейную задачу условной оптимизации с учетом иерархии в отношениях между субъектами управления. В качестве метода иерархического управления в модели (1) – (6) используется метод побуждения [6].

Алгоритм решения задачи основан на построении равновесия по Штакельбергу с учетом требований поддержания системы в гомеостазе и состоит в следующем:

1. Решается параметрическая задача (2), (3). Определяются оптимальные стратегии капитана судна в зависимости от стратегий начальника порта, т.е. величины $m^*(KN)$.

2. Найденные на предыдущем шаге величины $m^*(KN)$ подставляются в (1), (6).

3. Решается задача (1), (4) – (6). Находятся оптимальные стратегии начальника порта, позволяющие выполнить условие гомеостаза (5), (6).

4. Равновесие Штакельберга с учетом требования поддержания системы (1) – (6) в гомеостазе при побуждении имеет вид $(KN^*, m^*(KN))$.

В общем случае модель (1) – (6) исследуется путем прямого упорядоченного перебора на основе методологии имитационного моделирования согласно приведенному алгоритму.

Примеры расчетов

Приведем результаты нескольких модельных расчетов по предложенной модели (1) – (6).

Пример 1. Пусть входные функции модели (1) – (6) имеют следующий вид: $V(m) = C_1 m$; $F_{назор}(KN) = C_{назор} KN^\xi$; $F_{очистка}(V(m)) = C_{очистка} V(m)$; $F_{фракт}(m) = C_{фракт} m$; $T_{IFO}(m) = C_{IFO} m$; $T_{MGO}(m) = C_{MGO} m$; $T_{опер.расх}(m) = C_{о.р.} m$; $T_{тех.обсл}(m) = C_{тех.обсл} m$, где C_1 , $C_{назор}$, ξ , $C_{очистка}$, $C_{фракт}$, C_{IFO} , C_{MGO} , $C_{о.р.}$, $C_{тех.обсл} = \text{const}$; $C_{очистка}$ – стоимость очистки единицы объема сбрасываемых балластных вод; $C_{фракт}$ – плата владельцу судна за перевозку единицы груза (ставка фрахта); C_{IFO} , C_{MGO} – стоимость топлива марок IFO180 и MGO, необходимого для перевозки единицы груза; $C_{о.р.}$ – операционные расходы (зарплата команде и т.п.); $C_{тех.обсл}$ – отчисления на ремонт и техобслуживание в расчете на единицу груза.

Численные расчеты проводились методом прямого упорядоченного перебора на основе методологии имитационного моделирования. $C_{порт.расх} = 48\,000$ у.е.; $C_1 = 1$ м³/т; $C_{назор} = 1000$ м³; $\xi = 2$; $C_{очистка} = 2$ у.е./м³; $C_{фракт} = 45$ у.е./т; $C_{IFO} = 8,4$ у.е./т; $C_{MGO} = 2,13$ у.е./т; $C_{о.р.} = 4,17$ у.е./т; $C_{тех.обсл} = 1,3$ у.е./т; $C_{страх} = 14\,000$ у.е.; $M_{\min} = 2000$ т; $M_{\max} = 12\,000$ т; $KN_{\min} = 1$ у.е./м³; $KN_{\max} = 10$ у.е./м³; $B_{\max} = 50$ мг/м³; $B_0 = 20$ мг/м³; $W = 50$ мг/м³; $A = 10^7$ м³ (у.е. – стоимость в условных единицах).

В этом случае $KN^* = 6$ у.е./м³; $m^* = 12\,000$ т; $J_{судно}^* = 214\,000$ у.е.; $J_{порт}^* = 60\,000$ у.е., где KN^* , m^* – оптимальные стратегии начальника порта и капитана судна; $J_{судно}^*$, $J_{порт}^*$ – доход начальника порта и капитана судна в равновесии побуждения.

Пример 2. В случае входных данных примера 1 и $C_{фракт} = 20$ у.е./т, $C_{IFO} = 3,6$ у.е./т, $C_{MGO} = 0,84$ у.е./т, $KN_{\max} = 6$ у.е./м³ получим, что $KN^* = 4,92$ у.е./м³; $m^* = 12\,000$ т; $J_{судно}^* = 5,29$ у.е.; $J_{порт}^* = 58\,839,84$ у.е.

Входные данные примера 2 соответствуют морским грузоперевозкам в зимний период, когда наблюдаются сезонное понижение цен на топливо марок IFO180, MGO и уменьшение ставки фрахта. В этом случае эксплуатационная прибыль судна (доход капитана судна) становится близкой к 0. Несмотря на снижение размера платы порту за единицу сброшенного балласта (KN), доход начальника порта по сравнению с примером 1 практически не изменяется.

Пример 3. В случае входных данных примера 1 и $F_{фракт}(m) = C_2 m^\eta$; $C_2 = 3700$ у.е./т; $\eta = 0,5$ получим, что $KN^* = 3,68$ у.е./м³; $m^* = 8\,840,68$ т; $J_{судно}^* = 111\,945,74$ у.е.; $J_{порт}^* = 49\,303,53$ у.е.

Приведенные в этом примере входные данные соответствуют случаю, когда ставка фрахта является не фиксированной величиной, а рассчитывается исходя из массы перевозимого груза m . По сравнению с примером 1 в этом случае уменьшаются оптимальный размер платы KN^* и оптимальная масса груза m^* . В связи с этим снижается доход начальника порта. Несмотря на уменьшение KN^* , происходит значительное сокращение прибыли капитана судна.

Пример 4. В случае входных данных примера 3 и $C_2 = 2\,000$ у.е./т, $C_{IFO} = 3,6$ у.е./т, $C_{MGO} = 0,84$ у.е./т, $KN_{\max} = 6$ у.е./м³ получим, что $KN^* = 2,75$ у.е./м³; $m^* = 6\,242,42$ т; $J_{судно}^* = 17\,009,2$ у.е.; $J_{порт}^* = 45\,116,89$ у.е.

Входные данные этого примера соответствуют зимнему периоду времени. В сравнении с примером 2 происходит значительное уменьшение оптимального размера платы за сброс балласта; оптимальная масса перевозимого груза уменьшается почти вдвое, но доход капитана судна возрастает, а прибыль начальника порта уменьшается.

Пример 5. В случае входных данных примера 3 и $C_{порт.расх} = 360\,000$ у.е.; $C_{назор} = 9\,000$ м³; $C_2 = 170$ у.е./т; $\eta = 0,85$; $C_{страх} = 100\,000$ у.е.; $M_{\min} = 10\,000$ т; $M_{\max} = 90\,000$ т получим, что $KN^* = 5$ у.е./м³; $m^* = 90\,000$ т; $J_{судно}^* = 414\,108,3$ у.е.; $J_{порт}^* = 405\,000$ у.е.

Во входных данных примера 5 отражена ситуация, когда в состав УС входит порт с большей по сравнению с примером 3 акваторией и судно более высокого класса с большей грузоподъемностью. Начальник порта устанавливает средний (из возможных) размер платы KN^* . При данном значении KN капитану судна экономически выгодно перевезти максимально возможную массу груза m . По сравнению с примером 3 прибыли обоих участников значительно возрастают.

Пример 6. В случае входных данных примера 5 и $C_{очистка} = 4$ у.е./м³; $C_2 = 100$ у.е./т; $C_{IFO} = 3,6$ у.е./т,

$C_{MGO} = 0,84$ у.е./т, получим $KN^* = 3,04$ у.е./м³; $m^* = 90\,000$ т; $J_{судно}^* = 802,81$ у.е.; $J_{порт}^* = 190\,285,61$ у.е.

В данном примере рассматривается ситуация, когда в связи с зимним периодом времени происходит уменьшение стоимости топлива марок IFO180, MGO и ставки фрахта, однако стоимость работ по очистке акватории увеличивается. По сравнению с примером 5 уменьшается оптимальный размер платы KN^* , это оказывает негативное влияние на доход начальника порта (он сокращается почти вдвое). Капитану судна по-прежнему экономически выгодно перевозить максимальную массу груза. Однако его доход близок к нулю.

Пример 7. В случае входных данных примера 5 и $C_{надзор} = 22\,000$ м³; $\xi = 1,5$; $C_2 = 2\,700$ у.е./т; $\eta = 0,6$ получим, что $KN^* = 3,04$ у.е./м³; $m^* = 66\,813,7$ т; $J_{судно}^* = 387\,874,35$ у.е.; $J_{порт}^* = 312\,840,1$ у.е.

Несмотря на уменьшение (по сравнению с примером 5) размера оптимальной платы за сброс балластных вод KN^* , оптимальная масса перевозимого груза m^* снижается. Это приводит к сокращению дохода начальника порта. Однако прибыль капитана судна уменьшается незначительно.

Пример 8. В случае входных данных примера 7 и $C_{очистка} = 4$ у.е./м³; $C_2 = 1\,600$ у.е./т; $C_{IFO} = 3,6$ у.е./т, $C_{MGO} = 0,84$ у.е./т получим $KN^* = 2,05$ у.е./м³; $m^* = 57\,676,77$ т; $J_{судно}^* = 12,12$ у.е.; $J_{порт}^* = 182\,999,11$ у.е.

В данном примере входные данные соответствуют зимнему периоду времени. В сравнении с примером 7 начальник порта уменьшает практически до минимально разрешенного (для данного примера) уровня оптимальный размер платы за сброс балласта, оптимальная масса перевозимого груза незначительно уменьшается, но, несмотря на это, прибыль капитана судна близка к нулю. Доход начальника порта существенно сокращается.

В примерах 1 – 8 концентрация ЗВ в акватории порта не превышает предельно допустимых концентраций, стандарты качества (5) выполняются в соответствующих равновесиях.

Выводы

Анализ предложенной модели контроля качества сбрасываемого водяного балласта позволил сделать следующие выводы:

1. В зимний период происходит сезонное понижение цен на топливо марок IFO180 и MGO и, как следствие, уменьшается оптимальная ставка фрахта. Примеры 2, 4, 6, 8 показывают, что в этом случае доход капитана судна становится близок к 0.

2. Доход начальника порта в зимний период (примеры 2, 4) по сравнению с летним (примеры 1, 3) практически не меняется, несмотря на понижение оптимальной платы за сброс балластных вод.

3. Примеры 5, 7 показывают, что даже значительное увеличение расходов на оплату работы надзорных органов позволяет сохранять рентабельность порта на высоком уровне.

4. Из примеров 2, 4, 6, 8 видно, что в зимний период у начальника порта возникает необходимость уменьшать оптимальный размер платы за сброс балласта. В противном случае деятельность судна становится убыточной, и капитану судна выгодно ее не осуществлять.

5. Увеличение расходов на очистку акватории порта от загрязняющих веществ (примеры 6, 8) является одним из основных факторов, приводящих к сокращению прибыли начальника порта (примеры 5, 7), однако позволяет накапливать больше средств на проведение различных очистных мероприятий в акватории. Это дает больше возможностей для поддержания УС в гомеостазе, т.е. выполнения стандартов качества вод.

Литература

1. Александров Б.Г., Работнев В.Г. Оценка риска загрязнения водяным балластом судов: постановка задачи, подходы к решению, ожидаемые результаты // II науч.-практ. семинар по проблеме управления водяным балластом судов (для специалистов морских торговых портов). г. Одесса, Украина, 12 мая 2003 г. Одесса, 2003. № 5. С. 39 – 44.
2. Зайцев Ю.П. Введение в экологию Черного моря. Одесса, 2006. 224 с.
3. Матишов Г.Г., Селифонова Ж.П. Опыт контроля водяного балласта торговых судов в Новороссийском порту // Вестн. Южн. науч. центра. 2006. Т. 2, № 3. С. 58 – 62.
4. Работнёв В.Г. О работе в Черноморском регионе международной программы «Устранение барьеров на пути совершенствования управления контроля за судовыми балластными водами». URL: <http://www.eco-mir.net/show/522/> (дата обращения: 26.12.2011).
5. Полникова А.П. Результаты анализа качественного состава балластных вод, сброшенных в северо-западную часть Черного моря за 1997 – 2001 гг. URL: <http://www.eco-logylife.ru/ekologiya-chernogo-morya-2002/> (дата обращения: 27.12.2011).
6. Усов А.Б. Модели иерархического управления качеством водных ресурсов. Ростов н/Д, 2006. 291 с.
7. 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.