

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАЛЛАСТНОЙ ВОДЫ НА СУДНЕ

Этин В. Л., Сустретова Н. В., Захаров В. Н.

*ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», Нижний Новгород, Россия (603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5 А), e-mail: [sustretovanv@yandex.ru](mailto:sustretovanv@yandex.ru)*

В настоящей статье предметом исследований является процесс обезвреживания балластной воды со случайным переменным составом загрязнений с помощью хлора. На основании проведенных ранее экспериментальных исследований было получено математическое описание процесса обезвреживания и хранения балластной воды с переменным случайным составом. Для получения математической модели работы системы по обеспечению экологической безопасности математическое описание процессов обезвреживания и хранения балласта дополнено уравнениями энергетического и материального балансов рабочей среды (жидкого хлорпрепарата) в этой системе с учетом совместной ее работы с балластной системой судна. Полученная математическая модель позволит разработать методику определения основных характеристик судовой системы обеспечения экологической безопасности балластной воды. К которым относятся: необходимый запас хлорпрепарата, максимальный объем расходной цистерны с хлорпрепаратом, диаметр трубопровода системы, производительность насоса-дозатора, напор насоса-дозатора.

Ключевые слова: балластная вода, экологическая безопасность, математическая модель работы системы.

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR THE SHIP BALLAST WATER ECOLOGICAL SAFETY SYSTEM

Etin V. L., Sustretova N. V., Zakharov V. N.

*FSEI HPE «Volga state academy of water transport», Nizhniy Novgorod, Russia (603950, Nizhniy Novgorod, Nesterov St, 5 A), e-mail: [sustretovanv@yandex.ru](mailto:sustretovanv@yandex.ru)*

The process of rendering harmless ballast water containing random varying contaminants by using chlorine has been the subject of this investigation. A mathematical description of rendering harmless and storing the ballast water with random varying contaminants has been obtained on the basis of previous experimental research. In order to obtain a mathematical model for the operation of the ecological safety system, the mathematical description of rendering harmless and storing the ballast has been supplemented by equations of energy and material balances of the working medium (liquid chlorine compound) taking into consideration the joint operation of this system with the ship ballast system. The obtained mathematical model makes it possible to develop a method of determining the main characteristics of the ship ecological safety system for ballast water, which are the following: the required stock of chlorine compound, maximum capacity of the chlorine service tank, system pipeline diameter, capacity of the proportioning pump and proportioning pump dead.

Key words: ballast water, ecological safety, mathematical model of system operation.

### Введение

Применение хлорирования для обработки соленых балластных вод мало изучено. Актуальность обработки этого типа вод возникла в связи с катастрофическими последствиями вселения чужеродных видов (ввозимых с балластными водами судов) в природные экосистемы [1]. Реакцией мирового сообщества на данную глобальную экологическую проблему стала разработка Конвенции о контроле судовых балластных вод (2004 года) [3] (далее Конвенция), в которой указаны стандарты качества балласта, и вступление в силу данной Конвенции ожидается в 2013-14 гг.

Особенностью балластной воды является наличие случайного изменяющегося состава примесей. Поэтому требовалось проведение специального исследования процесса хлорирования соленых балластных вод судов.

### Постановка задачи

Анализ применяемой в настоящее время технологии обработки воды хлором показывает, что во всех случаях она основана на предварительной очистке воды до заданного стандарта и последующем обеззараживании хлором. Однако, если использовать такую технологию для обезвреживания балластной воды при приеме ее на борт судна, пришлось бы перед обезвреживанием воды проводить сначала лабораторное исследование состава воды, анализировать полученные данные, выбирать и осуществлять предварительную обработку, а только затем обезвреживать, что практически выполнить невозможно.

Исходя из этих соображений, решение проблемы видится авторам в определении некоторой минимально необходимой и непрерывно контролируемой концентрации активного хлора, вводимого тем или иным способом в балластную воду, которая имеет случайный состав, с целью достижения и поддержания стандарта качества по обеззараживанию балластной воды, заданных Конвенцией.

Величина необходимой вводимой концентрации активного хлора главным образом будет зависеть от двух групп факторов, характеризующих следующее:

- физико-химические свойства и состав заборной морской воды (температура ( $t^{\circ}\text{C}$ ), водородный показатель среды ( $\text{pH}$ ), соленость ( $s$ ), взвешенные вещества ( $g$ ), биологическое загрязнение ( $E$ ));
- техническое состояние балластных систем судна (взвешенные вещества ( $g_2$ ), концентрация железа ( $f$ ) и нефтепродуктов ( $v$ )).

Одновременно величина остаточного активного хлора при сбросе балласта в водоем не должна превышать установленных нормативов (0,3...0,5 мг/л) [4].

Математическое описание процесса обезвреживания и хранения балластной воды с переменным случайным составом на судах смешанного плавания было получено на основании экспериментальных исследований Сустретовой Н. В. и будет описываться следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{ax} = C_1 + C_2 = (6,9 + 0,012t - 0,46\text{pH} - 0,02s + 0,18g + 0,002E) + \\ + (1,24 + 0,07g_2 + 0,26f + 0,43v), \text{ мг/л} \\ C_{xp} = \tau \cdot C_{\tau} \cdot 10^{\frac{Ea_{\text{об}}}{2,303R} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T} \right) + \lg \left( \frac{2,303}{t} \cdot \lg \frac{C_{ax}}{C_i} \right)}, \text{ мг/л} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $C_{ax}$  – концентрация активного хлора для обезвреживания балластной воды с переменным составом, мг/л;

$C_{xp}$  – концентрация хлора, обеспечивающая экологическую безопасность хранения балластной воды, мг/л;

$\tau$  – время балластного рейса, с;

$C_{\tau}$  – остаточная концентрация хлора в момент времени  $\tau = 0$ , мг/л.

$Ea_{об}$  – энергия активации, кДж/моль;

$R$  – молярная газовая постоянная, равная 8, 314 кДж/(К·моль);

$T, T_u$  – соответственно известная и заданная температура воды, К.

$C_t$  – концентрация к моменту времени  $t$ , мг/л;

$t$  – время, сек.

Для обеспечения обезвреживания хлором балластных вод на борту судна необходимо обеспечить подачу его в воду в процессе заполнения балластных цистерн, где она должна находиться, во время всего балластного перехода.

Поэтому особенностью технологии обеззараживания балластной воды является отсутствие расхода хлорированной воды во время всего рейса судна. В связи с этим процесс обработки балластной воды хлором можно разделить на две стадии:

- 1) период обезвреживания воды во время балластировки;
- 2) период хранения хлорированной воды в балластной цистерне с автоматическим контролем и поддержанием остаточной концентрации хлора в балластной воде во время всего рейса.

Первая стадия технологии обработки балластной воды состоит в интенсивном смешивании воды с хлором в трубопроводе и ее подачи в балластный отсек, где обеспечивается необходимое для обезвреживания время контакта воды с хлором.

Цистерна для хранения расходного запаса концентрированного хлора должна изготавливаться из химически нейтрального (стойкого к хлору) материала и располагаться в непосредственной близости от точки ввода хлора в балластную воду.

Объем этой цистерны должен определяться расчётом, исходя из количества вводимого хлора, необходимого для обеззараживания максимального объема балластной воды во время рейса с учетом его длительности и температуры воды.

Ввод реагента с достаточной эффективностью может быть обеспечен насосом-дозатором. При этом насос-дозатор должен обеспечивать высокую точность дозирования (в том числе при ходе судна на волнении), возможность лёгкой и оперативной перестройки

режима работы, дистанционного управления импульсными и стандартными сигналами, стойкость к концентрированному хлору.

Вторая стадия – хранение балластной воды, занимает все время рейса судна с балластом, в процессе которого происходит поддержание остаточного активного хлора на заданном уровне.

Определенное количество хлора попадает в балластную цистерну и начинается активное окисление органики, сопровождающееся расходом реагента и снижением концентрации хлорагента.

Вследствие достаточно высокой активности дезинфектанта он вступает в химические реакции со многими органическими и некоторыми неорганическими веществами, находящимися в воде.

В ней присутствует большое количество сложных органических веществ и живых организмов, а также загрязнения, связанные с состоянием балластных танков судов.

Длительность балластных рейсов способствует диффузии активного хлора внутрь частичек мутности или осадков балластных танков, т.к. в этом случае эффективность хлорирования зависит от времени контакта (несколько дней).

Микробиологическая безопасность воды в любой точке балластной цистерны сохраняется благодаря эффекту последствия. Он заключается в том, что молекулы хлора сохраняют свою активность по отношению к микробам и угнетают их ферментные системы.

Достижение уровня остаточного активного хлора в балластной воде 0,5 мг/л обеспечивает этот эффект и соблюдение требований к сбросу балластной воды. Поэтому контроль содержания остаточного хлора в воде имеет важное значение для управления процессом обработки балластных вод. Для этих целей могут быть применены специальные анализаторы, широко представленные на рынке.

Ориентируясь на показания анализаторов хлора в балластных цистернах, могут возникать ситуации, при которых еще до окончания балластного рейса концентрация активного хлора снизится до нуля или будет значительно превышать заданный безопасный уровень хлора при сбросе (0,3...0,5) мг/л.

В первом случае потребуется дохлорирование воды, которое рассматривается как повторное введение в балластную воду заданной концентрации хлора с учетом уменьшения загрязнений в первом цикле хлорирования.

Для этого вновь включается балластный насос и насос-дозатор, а балластная вода по циркуляционному трубопроводу начинает движение из цистерны через балластный насос и точку ввода хлора вновь в цистерну.

А для решения второй проблемы необходимо провести дехлорирование с помощью установленного на судне оборудования по удалению остаточного хлора из балластной воды.

### Построение математической модели

Факторы, характеризующие физико-химические свойства и состав воды, задаются исходя из района плавания данного судна, а значения встречающихся в балластной воде загрязнителей, при разработке математической модели системы обеспечения экологической безопасности целесообразно принять на максимальном уровне. Поэтому уравнение для вычисления  $C_{\text{ax}}$  в выражении (1) можно упростить, если вместо  $g_2$ ,  $f$  и  $v$  подставить их числовые значения. В этом случае оно примет вид:

$$C_{\text{ax}} = B + 0,012t - 0,46pH - 0,02s + 0,18g + 0,002E, \text{ мг/л} \quad (2)$$

где  $B=11,8$  для балластной воды судов смешанного плавания.

Для моделирования работы балластной системы во время рейса с водой, обработанной хлором, уравнение для вычисления  $C_{\text{xp}}$  в выражении (1) можно упростить, если вместо величин  $Ea_{\text{об}}$ ,  $R$ ,  $T_u$  подставить их числовые значения. В этом случае оно примет вид:

$$C_{\text{xp}} = \tau \cdot C_{\tau} \cdot 10^{2,33 \left( 0,0033 - \frac{1}{T} \right) - 3,92}, \text{ мг/л} \quad (3)$$

При условии, что остаточная концентрация активного хлора при сбросе балласта  $C_{\text{ост}}$  должна быть в пределах 0,3...0,5, то суммарная концентрация активного хлора для обеспечения экологической безопасности балластной воды в течение балластного рейса на судах смешанного плавания  $C_{\text{эж}}$  может быть рассчитана по выражению:

$$C_{\text{эж}} = C_{\text{ax}} + C_{\text{xp}} + 0,3, \text{ г/м}^3 \quad (4)$$

Для обезвреживания балластной воды используются различные хлорпрепараты, содержание активного хлора в которых может значительно колебаться.

Поэтому в математической модели работы системы необходимо учитывать содержание активного хлора в применяемом для обеззараживания хлорпрепарате. Это можно сделать с помощью известного выражения [2]:

$$\tilde{N} = \frac{n \cdot 71}{M_{\text{ox}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $C$  – процентное содержание активного хлора в хлорпрепарате;

$n$  – степень окисления хлора в хлорпрепарате;

$71$  – молярная масса хлора ( $\text{Cl}_2$ ), г/моль;

$M_{\text{ox}}$  – молярная масса хлорпрепарата, г/моль.

Для разработки математической модели работы системы по обеспечению экологической безопасности математическое описание процессов обезвреживания и хранения балластной воды необходимо дополнить уравнениями энергетического и материального баланса рабочей среды (жидкого хлорпрепарата) в этой системе, с учетом совместной работы системы с балластной системой судна [5]:

$$H_{нд} = R_{xc} \cdot Q_{xc}^2 + H_{bc} - h_{xl}, \text{ м}^3 \quad (6)$$

$$Q_{xc} = \frac{\pi d^2}{4} v_{xc}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (7)$$

где  $H_{нд}$  – напор насоса-дозатора, м;

$R_{xc}$  – обобщенное сопротивление на участке от насоса-дозатора до узла смешения с балластной водой, с/м<sup>2</sup>;

$Q_{xc}$  – расход обеззараживающей жидкости в системе, м<sup>3</sup>/с;

$H_{bc}$  – напор в узле смешения (принимается по результатам гидравлического расчета балластной системы), м;

$h_{xl}$  – уровень гипохлорита натрия над точкой ввода в систему, м;

$v_{xc}$  – скорость течения обеззараживающей жидкости в системе, м/ч;

$d$  – диаметр трубопровода системы, м.

Поступающий концентрированный хлорпрепарат должен обеспечить концентрацию активного хлора, необходимую для обеспечения экологической безопасности балластной воды при известной производительности балластного насоса. Поэтому должно выполняться условие:

$$Q_{xc} \cdot C_{конц.хл} = Q_{бн} \cdot C_{эк}, \text{ г/ч}, \quad (8)$$

где  $C_{конц.хл}$  – концентрация активного хлора в используемом концентрированном хлорпрепарате, г/м<sup>3</sup>;

$Q_{бн}$  – производительность балластного насоса, м<sup>3</sup>/ч.

Таким образом, математическая модель работы системы обеспечения экологической безопасности балластной воды будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{вх} = B + 0,012t - 0,46pH - 0,02s + 0,18g + 0,002E, \text{ мг/л} \\ C_{xp} = \tau \cdot C_{\tau} \cdot 10^{2,33 \cdot \left(0,0033 - \frac{1}{T}\right) - 3,92}, \text{ мг/л} \\ C_{эк} = C_{вх} + C_{xp} + 0,3, \text{ г/м}^3 \end{array} \right. \quad (9)$$

$$C = \frac{n \cdot 71}{M_{xn}} \cdot 100\% , \%$$

$$H_{нд} = R_{xc} \cdot Q_{xc}^2 + H_{bc} - h_{xl} , м$$

$$Q_{xc} = \frac{\pi d^2}{4} v_{xc} , м^3/сек$$

$$Q_{xc} \cdot C_{конц.хл} = Q_{BH} \cdot C_{эк}$$

### **Вывод**

С помощью разработанной математической модели работы системы обеспечения экологической безопасности балластной воды на судне и имея в качестве исходных данных район плавания, принципиальную схему балластной системы судна, общий объем балластных цистерн, характеристики балластного насоса (напор и производительность), длительность балластного рейса и концентрацию исходного концентрированного раствора хлора – можно определить основные характеристики судовой системы обеспечения экологической безопасности воды на судне.

### **Список литературы**

1. Алимов А. Ф., Орлова М. И., Панов В. Е. Последствия интродукций чужеродных видов для водных экосистем и необходимость мероприятий по их предотвращению // Виды-вселенцы в европейских морях России: Сб. научных трудов. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2000. – С. 12-23.
2. Зайцев О. С. Общая химия. Направление и скорость химических процессов. Строение вещества. – М.: Высшая школа, 1983. – 248 с.
3. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2005. – 120 с.
4. СанПиН 2.1.2.1188-03 Плавательные бассейны. Гигиенические требования к устройству, эксплуатации и качеству воды. Контроль качества от 29.01.2003. М., 2003. – 18 с.
5. Этин В. Л. Экология судоходства: Конспект лекций. – Н. Новгород: ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2006. – 290 с.

### **Рецензенты:**

Отделкин Н. С., д.т.н., профессор кафедры прикладной механики и подъемно-транспортных машин ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», г. Нижний Новгород.

Наумов В. С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта», г. Нижний Новгород.