



УДК 34

А.С. Курников, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик Российской академии транспорта ФГБОУ ВО «ВГУВТ».

Д.Е. Шляхтин, аспирант 2 курса ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ СУДОВЫХ БАЛЛАСТНЫХ ВОД

В данной статье рассматривается создание математической модели для системы очистки судовых балластных вод. В ней описаны два экспериментальных опыта, проведенных на гидродинамическом кавитаторе. По результатам проведенных экспериментов, были найдены оптимальные характеристики эжектора – кавитатора (Э-К).

Ключевые слова: математическая модель, балластная вода, система очистки балластной воды, эжектор – кавитатор.

Одной из экологических проблем в нашей современности является перенос чужеродных видов живых организмов в другие части континента вместе с балластными водами судов. При попадании в новую среду обитания живые микроорганизмы быстро размножаются, нанося опустошительный урон экосистемам, местным экономикам и здоровью людей. В связи с этой проблемой Международная морская организация (ИМО) приняла Конвенцию о контроле судовых балластных вод, осадков и операций с ними от 2004 года, в соответствии с которой в ближайшее время поэтапно будут внедряться требования по очистке и обеззараживанию балластной воды.

На кафедре ТКМ и МР была разработана принципиальная схема очистки балластных вод, одним из основных узлов которой является Э-К. Опытный образец Э-К спроектирован и изготовлен в лаборатории металлорежущего оборудования ВГУВТ, но для оптимизации конструкции Э-К необходимо провести его экспериментальные исследования.

Оптимизация конструкции Э-К производится по 4 факторам, к которым относятся[1]:

- L - расстояние между срезом сопла и входным отверстием камеры смешения, мм;
- F_1/F_c - Отношение площадей камеры смешения к выходному отверстию сопла, мм;
- Δp - перепад давлений в Э-К, $\Delta p = p_1 - p_2$, кПа;
- α – угол атаки на выходе из колец диффузора.

Параметром оптимизации является давление в камере смешения $p(y)$.

При проведении экспериментальных исследований были использованы основные положения теории планирования[2,3,4]. Матрица планирования принимается типа 2^4 , позволяющая сократить количество опытов в 2 раза без ухудшения точности

эксперимента. Сама матрица представлена в табл. 2 для Э-К производительностью 1 м³/ч.

Для проведения экспериментальных исследований процессов, происходящих в гидродинамическом кавитаторе, был разработан стенд, внешний вид которого изображен на рис.1.



Рисунок 1 – Внешний вид стенда для испытания Э-К.

На рис.2 показаны графические зависимости параметра оптимизации $p(y)$ от факторов и их взаимодействий для кавитатора производительностью 1 м³/ч.

Таблица 1 - Матрица планирования и результаты эксперимента типа 2⁴

Факторы	L, мм	F ₁ /F _c	Δp (dP), кПа	Угол α	p (y), кПа	Количество сигнальных ламп кавитометра
Номер опыта	1	-	-	-	-30	3
	2	-	-	+	-76	7
	3	-	-	-	+1 50	-
	4	-	-	+	+8 8,5	-
	5	-	+	-	-30	3
	6	-	+	+	-89	8
	7	-	+	-	-21	2
	8	-	+	+	- 90,5	8
	9	+	+	-	-20	2
	10	+	+	+	-86	8
	11	+	-	-	+1 80	-
	12	+	-	+	+1 10	-
	13	+	+	-	-30	3

	14	+	+	+	-	-85	8
	15	+	-	-	-	+2 0	-
	16	+	-	+	-	-65	6

Standardized Pareto Chart for p_y

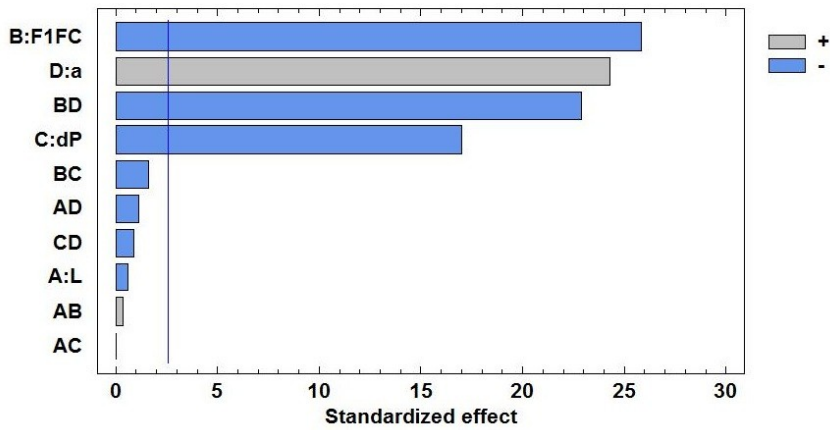


Рисунок 2 – Карты Парето для $p(y)$.

Графики влияния основных факторов (рис.3) и графики их взаимодействий (рис.4) более наглядно позволяют оценить воздействие факторов на целевую величину – $p(y)$.

Main Effects Plot for p_y

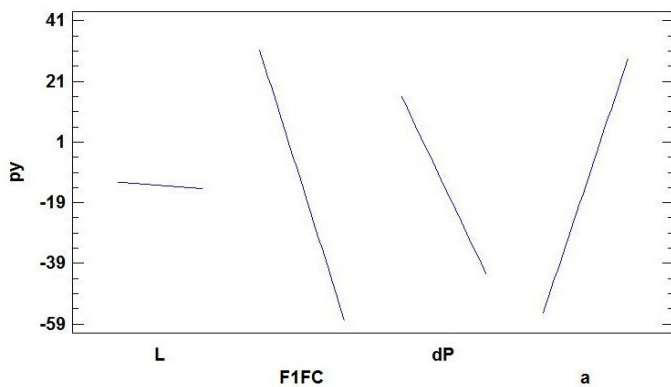


Рисунок 3 – Графики влияния основных факторов для $p(y)$.

Interaction Plot for p_y

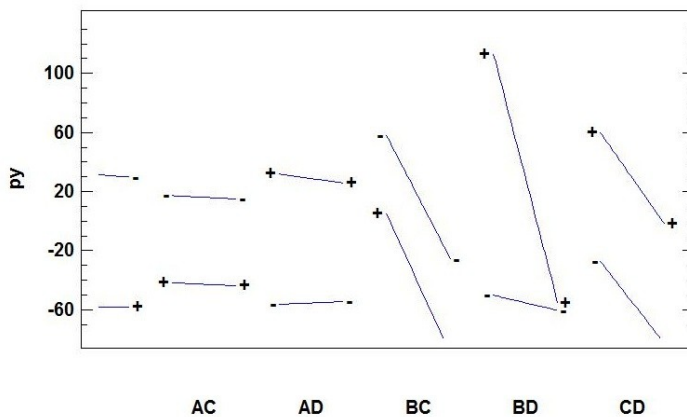


Рисунок 4 – Графики взаимодействия основных факторов для $p(y)$.

В результате математической обработки экспериментальных данных гидродинамического кавитатора производительностью 1 м³/ч получено уравнение регрессии, описывающее влияние указанных факторов на давление в камере смешения p(y), кПа:

$$p_y = -13,3125 - 1,0625 \times L - 44,75 \times F1FC - 29,4375 \times dP + 42,0625 \times a + 0,625 \times L \times F1FC + 0,0625 \times L \times dP - 1,9375 \times L \times a - 2,75 \times F1FC \times dP - 39,625 \times F1FC \times a - 1,5625 \times dP \times a$$

Основываясь на картах Парето (рис.1) и исключении несущественных взаимодействий (менее 15% от полученных данных) произведем упрощение выражения, кПа:

$$p_y = -13,3125 - 44,75 \times F1FC - 29,4375 \times dP + 42,0625 \times a - 39,625 \times F1FC \times a$$

При проведении второго эксперимента исследуется кавитатор производительностью 10 м³/ч, для проверки гипотезы о линейной зависимости параметра оптимизации p(y)[5]. Матрица планирования и результаты испытаний которого представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Матрица планирования и результаты эксперимента типа 2⁴.

Факторы	L, мм	F ₁ /F _c	Δp (dP), кПа	Угол α	p (y), кПа	Количество сигнальных ламп кавитометра
Номер опыта	1	-	-	-	-30	3
	2	+	+	-	17,5	2
	3	+	+	-	-30	3
	4	-	+	-	-32	3
	5	-	-	+	-76	7
	6	+	+	+	77,5	8
	7	-	+	+	-89	8
	8	-	+	+	90,5	8
	9	+	-	-	+1 50	-
	10	-	-	-	+1 30	-
	11	-	+	-	-21	2
	12	+	-	-	-20	2
	13	+	-	+	+8 8,5	-
	14	-	-	+	+8 4	-
	15	+	-	+	- 90,5	8
	16	+	+	+	-91	8

На рис.5 показаны графические зависимости параметра оптимизации p(y) от факторов и их взаимодействий для кавитатора производительностью 1 м³/ч.

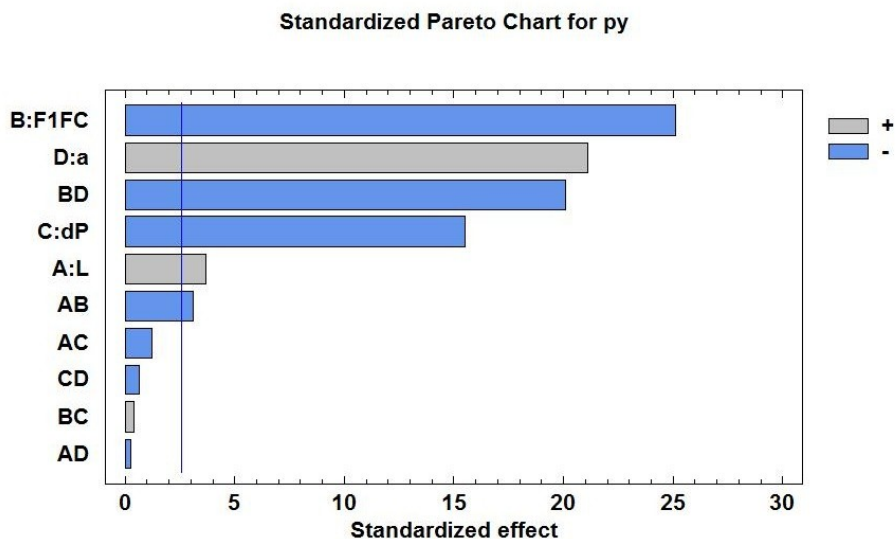


Рисунок 5 – Карты Парето для $p(y)$.
 Графики влияния основных факторов (рис.6) и графики их взаимодействий (рис.7) более наглядно позволяют оценить воздействие факторов на целевую величину – $p(y)$.

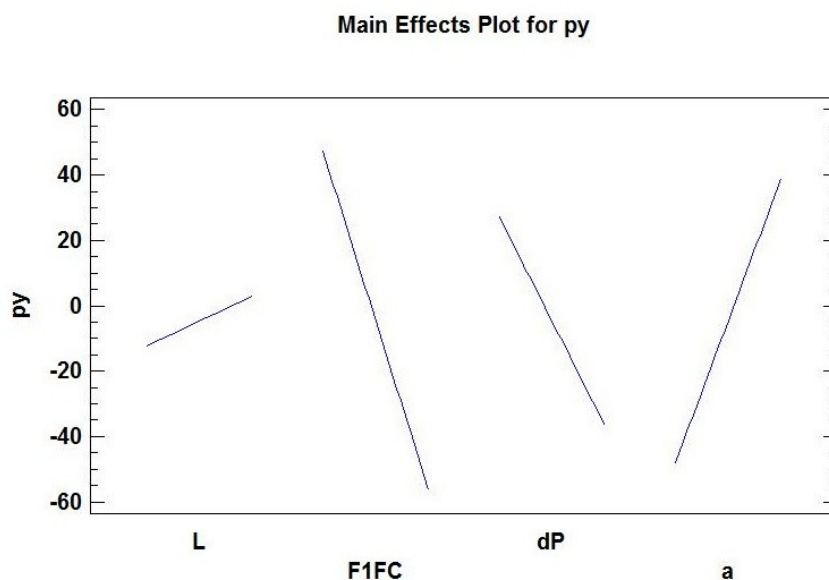


Рисунок 6 – Графики влияния основных факторов для $p(y)$.

Interaction Plot for p_y

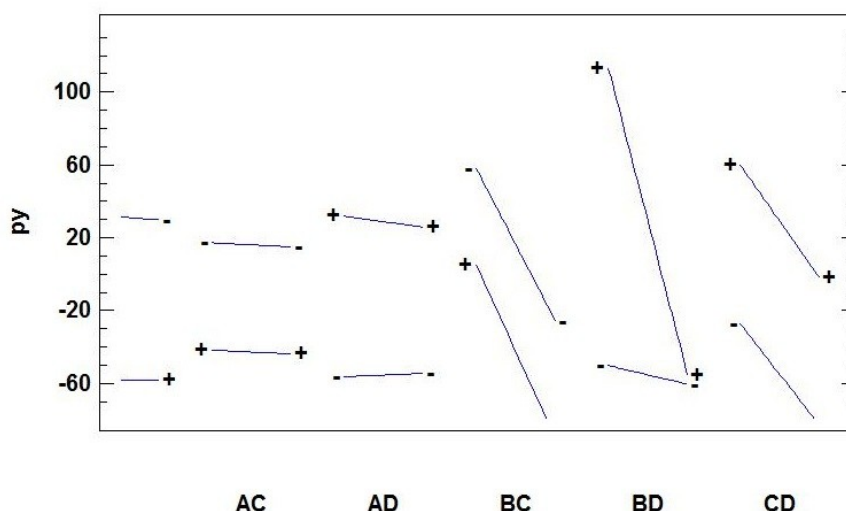


Рисунок 7 – Графики взаимодействия основных факторов для p (y).

Проведя математическую обработку экспериментальных данных устройства производительностью 10 м³/ч, было получено уравнение регрессии, описывающее влияние пяти факторов на процесс кавитации, кПа:

$$p_y = -13,3125 - 1,0625 \times L - 44,75 \times F1FC - 29,4375 \times dP + 42,0625 \times a + 0,625 \times L \times F1FC + 0,0625 \times L \times dP - 1,9375 \times L \times a - 2,75 \times F1FC \times dP - 39,625 \times F1FC \times a - 1,5625 \times dP \times a$$

Основываясь на картах Парето (рис.4) и исключении несущественных взаимодействий (менее 15% от полученных данных) произведем упрощение выражения, кПа:

$$p_y = -13,3125 - 1,0625 \times L - 44,75 \times F1FC - 29,4375 \times dP + 42,0625 \times a + 0,625 \times L \times F1FC - 39,625 \times F1FC \times a$$

Расхождение между полученными результатами по уравнениям регрессии кавитаторов производительностью 1 м³/ч и 10 м³/ч не превышает 5%, что свидетельствует об отсутствии «масштабного» эффекта. Поэтому окончательно уравнение регрессии для кавитаторов производительностью (1 – 10 м³/ч) будет иметь вид:

$$p_y = -13,234 - 1,245 \times L - 44,567 \times F1FC - 29,135 \times dP + 42,243 \times a + 0,576 \times L \times F1FC - 39,352 \times F1FC \times a$$

Оценку качества полученной математической модели производим по коэффициенту множественной детерминации R². Среднее значение R² составляет 99,76 %, что свидетельствует о высокой адекватности полученной математической модели.

Математическая модель работы кавитатора позволяет определить его оптимальные характеристики (табл. 3).

Таблица 3 - Оптимальные характеристики эжектора – кавитатора 1 м³/ч/ 10 м³/ч

Признак оптимизации	Значение параметра, p(y), кПа	Значение факторов			
		L, мм	a, мм	F ₂ /F ₁	Δp, кПа
Минимизация p(y), кПа	-89	3	15	3,6	350

Список литературы:

- [1] Рязанцев А.А., Васильева Н.Б., Батоева А.А. Окисление нитрофенола в воде с использованием гидродинамической кавитации// Химия в интересах устойчивого развития, т.15, 2007, №6.- с.715-720.
- [2] Адлер О.П. Введение в планирование эксперимента.-М.: Металлургия, 1968.-155с.
- [3] Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах.-СПб.: Питер, 1997.-240с.
- [4] Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании.-М.: Статистика, 1978.-335с.
- [5] Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М.М. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики).-М.:Металлургия,1978.-112с.

THE CREATION OF MATHEMATICAL MODELS OF PURIFICATION SYSTEMS OF BALLAST WATER

A. S. Kurnikov , D. E. Shlyakhtin

This article discusses the creation of a mathematical model for the system of cleaning of ships ' ballast water. It describes two pilot experience, carried out on gidrodinamicheskaya. According to the results of the experiments, were found to be the optimum performance of ejector – cavitator (a-C).

Key words: mathematical model, ballast water treatment system ballast water ejector – cavitator.