



**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ И МНОГОЦЕЛЕВА ОПТИМИЗАЦИЯ НА
ДВИЖЕНИЕТО НА КАРУСЕЛНА СИСТЕМА ЗА ПРЕНОС НА ТЕЧНОСТИ
В ПАКЕТИРАЩИ МАШИНИ**

**EXPERIMENTAL STUDY AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF THE MOTION
OF A MERRY-GO-ROUND SYSTEM FOR FLUID TRANSPORTATION IN PACKAGING
MACHINE**

Галя Дунчева* Николай Марчев
Технически университет - Габрово

Статията е постъпила на 05 януари 2016 г.; приета за отпечатване на 24 февруари 2016 г.

Abstract

This article presents the results from a multi-objective optimization of the geometric parameters of Maltese mechanism for transferring containers with fluid. The study is directed to minimization the spatter fluid during its transportation in open containers. Because of the specific of the research problem, a high-speed digital camera is used. To quantify the spatter effect a methodology for experimental data systematization is developed. It is proved that S-shaped cannels of Maltese mechanism provide damping spatter. In order to formulate the optimization problem a planned experiment is conducted. On this basis, regression models for the objective functions are obtained. The optimization is carried out in accordance with a genetic algorithm. Thus, the optimal geometric parameters of the S-shaped cannels are established.

Keywords: planned experiment, multi-objective optimization, Maltese mechanism, fluid transportation, packaging machine

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременни условия е безспорно значението на качеството на опаковките и процеса на опаковане за почти всички стоки, предлагани на крайния потребител. И ако за твърдите продукти в определени случаи е възможно да се елиминира процеса на опаковане, то за течните продукти процесът на опаковане е от определящо значение за отношението цена/качество.

Като цяло, технологичният цикъл на опаковане на течни продукти в твърди опаковки съдържа следната последователност от операции: зареждане на опаковката, напълване, поставяне на капачка, термозалепване и освобождаване на готовата опаковка. Спомагателното движение в този цикъл практически се свежда до циклично прекъснато движение на съответните делителни механизми [1,2]. То причинява движение на течността в опаковката, което физически се свързва с явлението „плискане“. За конкретен вискозитет на течността, размери и геометрия на опаковката, степента на пликкането зависи от закона на движение на съответното изпълнително звено в механичната система на опаковъчната машина. Неконтролираното пликкане от една страна води до некачествено запечатани опаковки и отсъствие на херметичност, а от друга – до повишени енергийни разходи поради необходимостта от изпаряване на попадналите капки течност в зоната на термозалепване.

Преместването на опаковките се определя от съответния делителен механизъм. Най-масово използваният

механизъм за прекъсната еднопосочна ротация е малтийският механизъм, поради компактността му и удобството да преобразува непрекъснатото въртливо движение на задвижващото звено в периодично прекъснато движение на изпълнителното звено – малтийския кръст. Тъй като времето за преместване на опаковката от една позиция на друга практически се определя от производителността, то степента на пликкането е в пряка зависимост от геометрията на каналите на малтийския кръст. Каруселните системи за пренос на контейнери с течности, базирани върху малтийски механизъм, са смесени системи, тъй като съдържат едновременно твърди тела и флуиди. Управлението на такива системи практически се свежда до минимизиране на инерционните натоварвания на позициониращата система. Проблемът се усложнява поради липсата на корелация между движението на течния продукт и движението на механизмите в машината. *Следователно, оптимизирането на процеса на пренасяне на течности трябва да се основава върху избор на подходящ модел на закона на движение на изпълнителното звено, получен на основа на натурни експерименти.*

Основна цел на работата е да се оптимизира геометрията на каналите на малтийски кръст в каруселна система за пренос на течности с оглед на минимизиране на ефекта от пликкане в условията на постоянна скорост на задвижващото звено. За постигане на целта е проведен планиран експеримент и е формулирана и решена многоцелева оптимизационна задача.

* Тел.: 066 827 312; e-mail: duncheva@tugab.bg

2. ПЛАНИРАН НАТУРЕН ЕКСПЕРИМЕНТ

2.1. Експериментална установка

За целите на експерименталното изследване е разработена експериментална установка (фиг. 1), включваща механично задвижване, малтийски механизъм, акселерометър тип *KSS0* на фирмата *Metra Mess- und Frequenztechnik* (с резонансна честота $>30kHz$), поставен непосредствено на малтийския кръст, АЦП платка за преобразуване на сигнала за ускорението на малтийския кръст в цифров вид. Чрез последващо тариране се визуализира изменението на ускорението в реално време. Предвид спецификата на изследвания проблем, за оценяване на ефекта от пликане е използвана дигитална високоскоростна камера *Casio EH-F1 – 60FPS*, осигуряваща 1200 кадъра в секунда (фиг. 1). За получаване на концентрирана светлина в зоната на експеримента са използвани комплект осветителни тела, разположени по определена схема.



Фиг.1 Експериментална установка

Оценява се ефекта от пликане само в тангенциално (окръжно) направление, като се пренебрегва центробежния ефект, тъй като анализът на профила в сечение в радиална посока показва, че отклонението е около 10 пъти по-малко, отколкото в сечение, тангенциално към дъгата на траекторията. На тази основа е прието да се използват плоски прозрачни контейнери с размери $L=100\text{ mm}$, $B=5\text{ mm}$, $H=50\text{ mm}$, ориентирани тангенциално с дължината си.

Предвид спецификата на изследвания проблем, за оценяване на ефекта от пликане е използвана дигитална високоскоростна камера *Casio EH-F1 – 60FPS*, осигуряваща 1200 кадъра в секунда.

2.2. Методика за количествена оценка на ефекта от пликане

За количествена оценка на пликането е разработена методика за обработка на данните от експеримента.

Методиката съдържа следните основни етапи:

1. Заснетият материал се разделя на кадри през определен интервал – изпълнен е с програмен продукт *SONY VEGAS PRO 11*;

2. Прави се селекция на важните за опита кадри – количеството на кадрите е в голям обем, а движението на флуида е инертно;

3. Изработва се растерна решетка – изработени са няколко варианта на решетки с растер от 1 mm, до 10 mm. След предварителни проби е уточнена решетка с размери на растери – 5 mm;

4. Извършва се растерно кодиране на профилите на вълната чрез наслагване на растерната решетка върху всеки избран кадър – операцията се извършва ръчно – фиг. 4.1;

5. Извършва се машабиране на профилите на вълната чрез наслагване на растерната решетка върху всеки избран кадър - операцията се извършва ръчно;

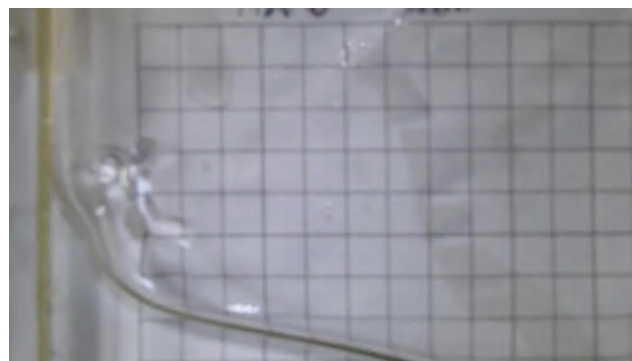
6. Получените точки, респективно профил се пренасят в аналогична координатна система на графична програма;

7. Обработка на резултатите и апроксимация в графичен вид.

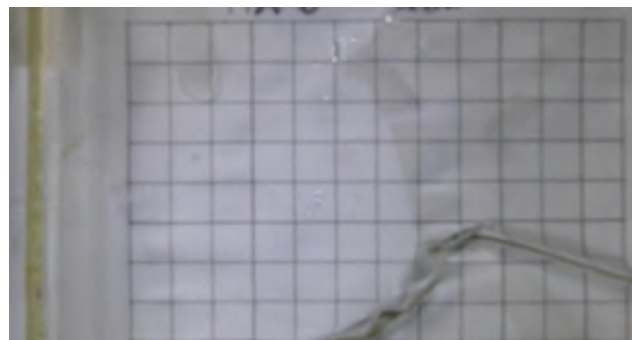
2.3. Детайли на експеримента

За избор на вида на геометрията на каналите на малтийския кръст е проведен предварителен експеримент с различни некръгли канали, базирани върху комбинация от дъги, както и такива с *S*”-образна геометрия. Установено е, че за осигуряване на ефект на гасене на вълната при пликане на течността в контейнера, е необходимо да се използват *“S”*-образни криволейни канали.

На фиг. 2 е показан кадър, визуализиращ момента на гасене на вълната при преминаване на палеца към вътрешността на канала, а на фиг. 3 е показан кадър, визуализиращ момента след процеса на гасене на вълната при връщане на палеца от вътрешността на канала.



Фиг.2 Кадри от заснет процес на ударно гасене на лява вълна

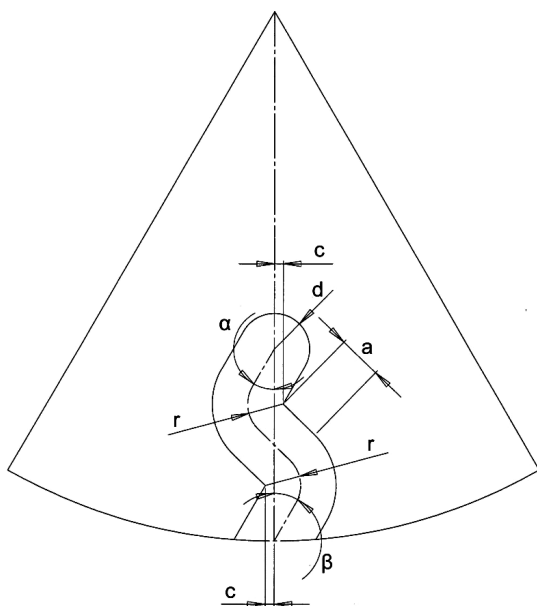


Фиг.3 Кадри от заснет процес на ударно гасене на дясна вълна

Планираният експеримент има за цел да се направи количествена оценка на влиянието на геометричните параметри на “S”-образни канали върху ефекта от гасене на вълната при пликване на вода в условията на каруселна система.

Геометричните параметри на “S”-образните канали са (фиг. 4):

- Ъгъл на траекторията на входа на канала спрямо радиалната ос на симетрия – β , rad;
- Ъгъл на траекторията на изхода на канала спрямо радиалната ос на симетрия – α , rad;
- Разстояние между срещуположните дъги на траекторията на канала – a , mm;
- Разстояние между центъра на радиусите на кривина и радиалната ос на симетрия – c , mm;
- Диаметър на палеца – d , mm;
- Радиус на кривина по оста на симетрия на канала – r , mm.



Фиг. 4 Геометрични параметри на S-образни нелинейни канали на МК

Постоянните параметри, приети по конструктивни съображения са: $d = 16$ mm, $r = 8$ mm. Провежда се пълен факторен експеримент от вида 2^4 с указаните четири управляващи фактора (фиг. 4). Нивата на факторите в натурален и кодиран вид са показани в табл. 1.

Управляващи фактори и техните нива Таблица 1

Управляващи фактори		Нива на факторите	
x_1	Ъгъл β , deg.	Натурални	20 60
		Кодирани	-1 +1
x_2	Ъгъл α , deg	Натурални	20 60
		Кодирани	-1 +1
x_3	Линеен параметър a , mm	Натурални	10 30
		Кодирани	-1 +1
x_4	Линеен параметър c , mm	Натурални	1 5
		Кодирани	-1 +1

За количествена оценка на пликването за всяка експериментална точка са въведени следните параметри (целеви функции):

- $Y1 \equiv m1max$ [mm] – максимално отклонение на течността в момента на влизане на палеца;

- $Y2 \equiv n1max$ [mm] – минимално отклонение на течността в момента на влизане на палеца;

- $Y3 \equiv m2max$ [mm] – максимално отклонение на течността в момента на излизане на палеца;

- $Y4 \equiv n2min$ [mm] – минимално отклонение на течността в момента на излизане на палеца;

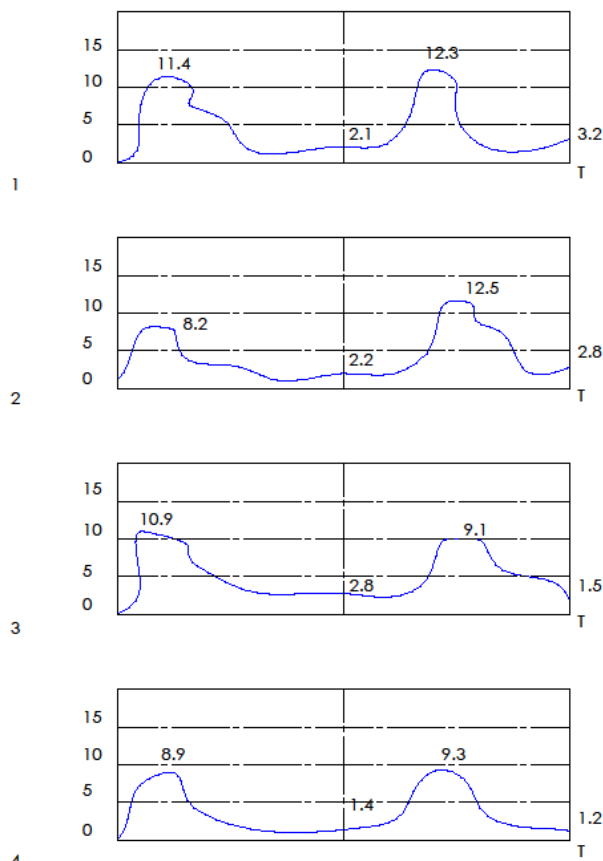
2.4. Резултати от експеримента

В таблица 2 са показани плана на експеримента и резултатите от него.

План на експеримента и резултати Таблица 2

№	Управляващи фактори				Изходни параметри			
	x_1	x_2	x_3	x_4	$Y1$, mm	$Y2$, mm	$Y3$, mm	$Y4$, mm
1	+1	+1	+1	+1	11,4	2,1	12,3	3,2
2	-1	+1	+1	+1	8,1	2,2	12,5	2,8
3	+1	-1	+1	+1	10,9	2,8	9,1	1,5
4	-1	-1	+1	+1	8,9	1,4	9,3	1,2
5	+1	+1	-1	+1	11,1	3,1	9,8	2,3
6	-1	+1	-1	+1	9,3	2,5	11,4	1,8
7	+1	-1	-1	+1	11,3	2,8	10,2	1,5
8	-1	-1	-1	+1	8,7	1,3	9,8	1,4
9	+1	+1	+1	-1	12,3	3,2	11,4	2,6
10	-1	+1	+1	-1	9,3	2,8	12,6	2,5
11	+1	-1	+1	-1	11,5	2,9	10,2	1,8
12	-1	-1	+1	-1	9,6	1,6	10,2	1,5
13	+1	+1	-1	-1	12,3	2,8	11,6	2,5
14	-1	+1	-1	-1	10,4	2,6	12,8	2,3
15	+1	-1	-1	-1	12,5	3	11,3	2,1
16	-1	-1	-1	-1	10,2	1,8	11,8	1,8

Обработените резултати за профила на вълната в съответствие с методиката за първите четири експериментални точки са показани на фиг. 5.



Фиг. 5 Профил на вълната за първите четири експериментални точки

3. ОПТИМИЗИРАНЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА КАРУСЕЛНА СИСТЕМА ЗА ПРЕНОС НА ТЕЧНОСТИ

3.1. Постановка на оптимизационната задача

За провеждане на оптимизацията допълнително се изчисляват следните две целеви функции:

$$Y5 = Y1 - Y2, \text{ mm} \quad (1)$$

$$Y6 = Y3 - Y4, \text{ mm} \quad (2)$$

Оптимизацията се базира върху следните условия:

1). Условие, гарантиращо минимално отклонение на профила на вълната в момента на влизане на палеца в канала на МК:

$$Y1 \rightarrow \min; \quad (3)$$

2). Условие, гарантиращо минимално отклонение на профила на вълната в момента на излизане на палеца от канала на МК:

$$Y3 \rightarrow \min; \quad (4)$$

3). Условие, гарантиращо минимална турбуленция на течността в контейнера в момента на влизане на палеца в канала на МК:

$$Y5 \rightarrow \min; \quad (5)$$

4). Условие, гарантиращо минимална турбуленция на течността в контейнера в момента на излизане на палеца от канала на МК:

$$Y6 \rightarrow \min. \quad (6)$$

Оптимизационната задача се състои в определяне на стойността на числовия вектор:

$\{x^*\} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, за които едновременно да са удовлетворени условия (1) - (6).

Оптимизацията е проведена в съответствие с „генетичен алгоритъм“, като целевите функции са въведени според приоритета им в следната последователност: $Y1, Y3, Y5, Y6$.

Посочената последователност на подреждане на целевите функции гарантира, че се акцентира върху условията за минимизиране на плискането в началото и в края на работния цикъл.

3.2. Регресионни модели

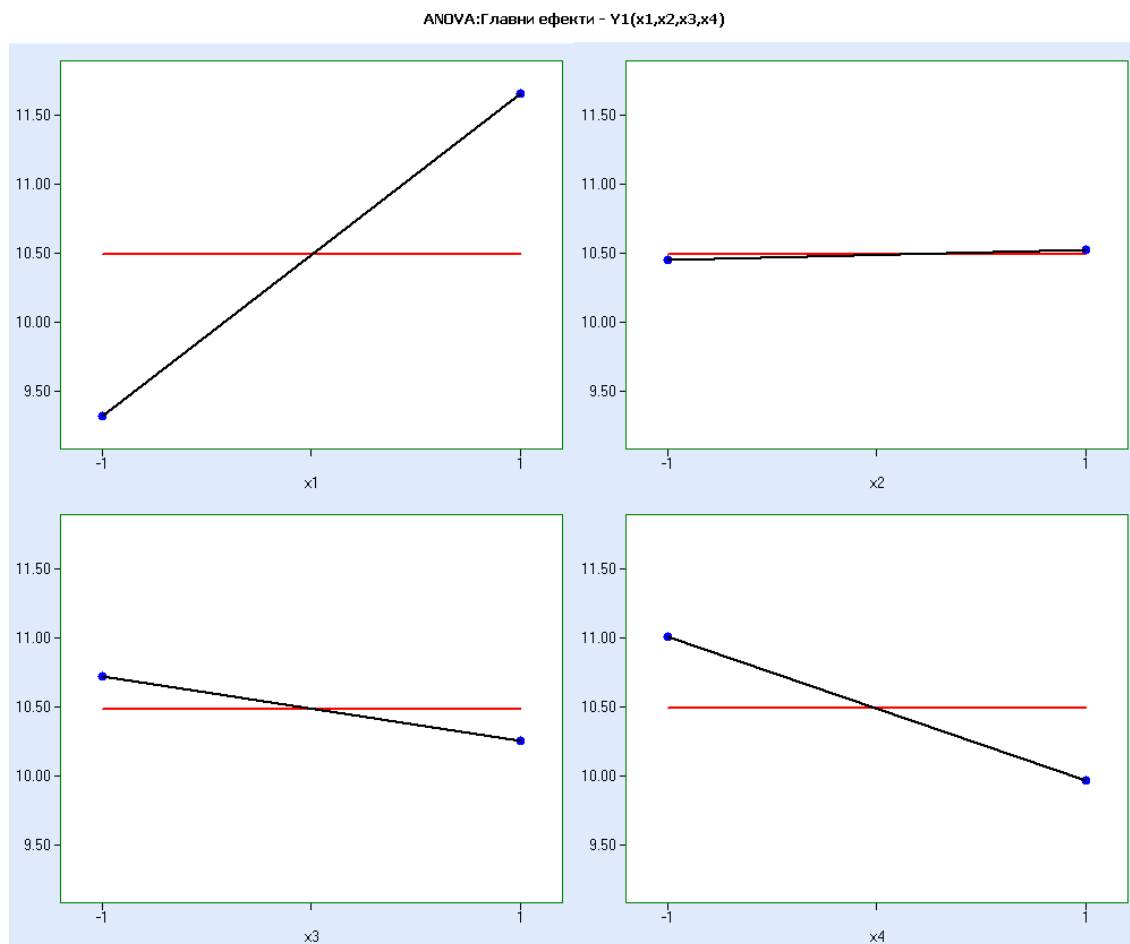
За регресионен анализ е използвана системата Qstat-Lab, базирана върху статистическите методи за управление на качеството [3]. С цел да се определи относителната тежест и влиянието на факторите върху изследваните целеви функции е проведен и дисперсионен анализ ANOVA (Analysis Of Variance). В статията е показано влиянието на факторите чрез т.н. „Главни ефекти“ само по отношение на функцията $Y1$.

• Регресионен модел на функцията $Y1$

За регресионен модел на функцията $Y1$ е избран следният полином: (4.9)

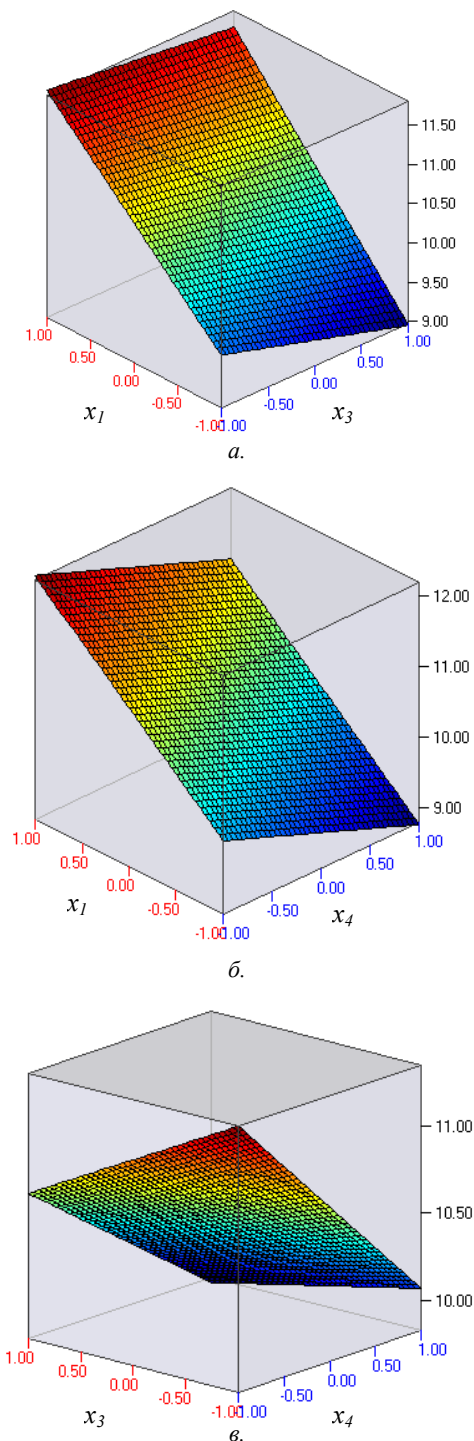
$$Y1 = 10.488 + 1.175x1 - 0.237x3 - 0.525x4 + 0.100x1x3 + 0.100x3x4 + 0.075x1x2 \quad (7)$$

Влиянието на факторите чрез главните ефекти е показано на фиг. 6.



Фиг. 6 Влияние на факторите върху функцията $Y1$

Очевидно, основният фактор, влияещ върху минималното отклонение на профила на вълната в момента на влизане на палеца в канала на ММ е x_1 (ъгъл β). Следващите по влияние фактори са x_4 и x_3 – съответно линейните параметри a и c . Факторът x_2 (ъгъл α) практически не оказва влияние върху $Y1$. Показани са сечения на хиперповърхнината на модела на $Y1$ с различни хиперравнини, визуализиращи влиянието на два от факторите, като останалите се поддържат на средно ниво (фиг. 7 а, б, в).



Фиг. 7 Сечения на хиперповърхнината на модела на $Y1$ с различни хиперравнини

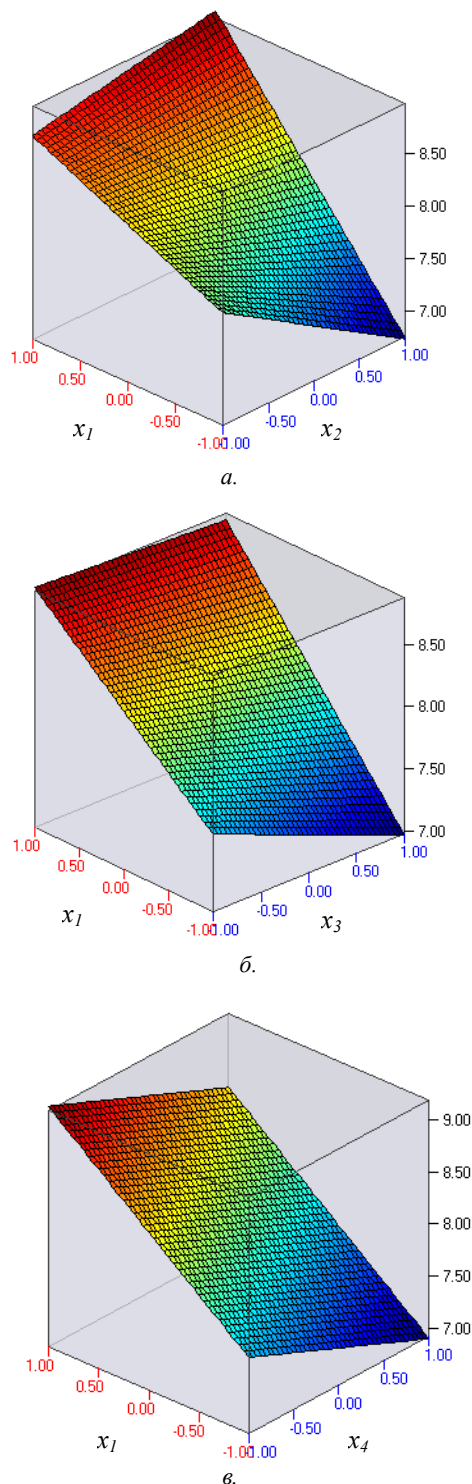
• Регресионен модел на функцията $Y5$

За регресионен модел на функцията $Y5$ е избран полинома:

$$Y5 = 8.056 + 0.769x_1 - 0.194x_2 - 0.181x_3 - 0.369x_4 +$$

$$+ 0.344x_1x_2 + 0.194x_3x_4 + 0.131x_1x_3 \tag{8}$$

Минимизирането на функцията $Y5$ е насочено към минимална турбуленция на течността в контейнера в момента на влизане на палеца в канала на ММ. От проведения дисперсионен анализ е установено, че върху нея най-голямо е влиянието на x_1 (ъгъл β), а следващият по значение фактор е x_4 (линейния параметър c). Същевременно, тези фактори имат разпосочно действие върху целевата функция $Y5$ – за нейното минимизиране е необходимо ъгъл β да е минимален, а линейния параметър c трябва да е на горно ниво. Показани са сечения на хиперповърхнината на модела на $Y5$ с различни хиперравнини (фиг. 8а, б, в), потвърждаващи определящото влияние на факторите x_1 и x_3 .



Фиг. 8 Сечения на хиперповърхнината на модела на $Y5$ с различни хиперравнини

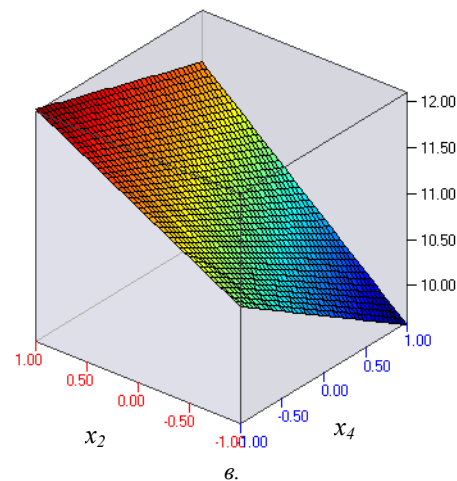
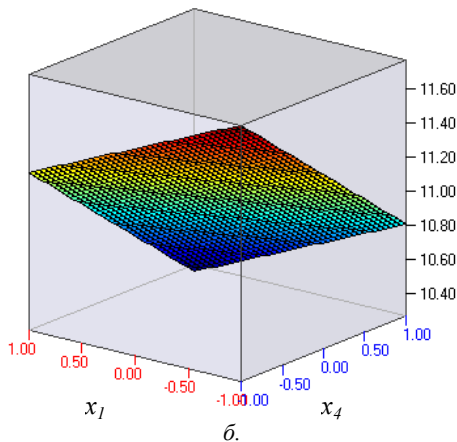
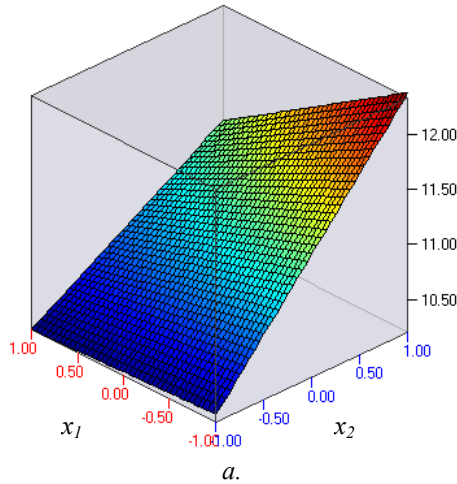
• **Регресионен модел на функцията Y3**

За регресионен модел на функцията Y3 е избран

следния полином:

$$Y3 = 11.019 - 0.281x1 + 0.781x2 - 0.469x4 - 0.244x1x2 + 0.469x2x3 + 0.319x3x4 + 0.169x2x4 \quad (9)$$

Минимизирането на функцията Y3 гарантира минимално отклонение на профила на вълната в момента на излизане на палеца от канала на МК. От проведеня дисперсионен анализ е установено, че основно влияние върху нея оказват факторите x_2 и x_4 , т.е. ъгъл α и линейния параметър c , които имат разнопосочно действие. За осигуряване на минимално отклонение на профила на вълната в момента на излизане на палеца от канала е необходимо ъгъл α да е минимален, а параметърът c – максимален. Факторът x_3 оказва незначително влияние.



Фиг. 9 Сечения на хиперповърхнината на модела на Y3 с различни хиперравнини

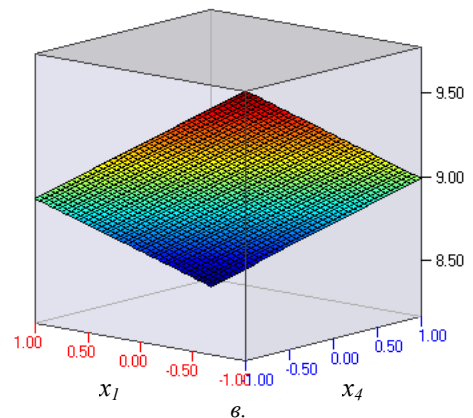
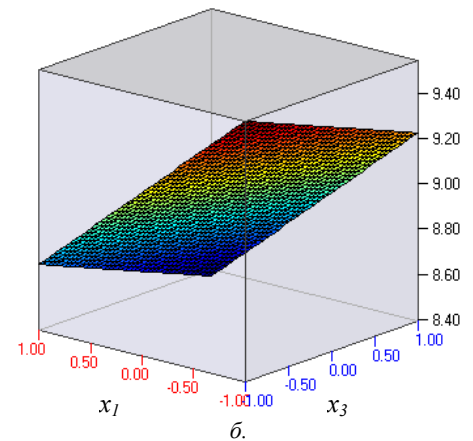
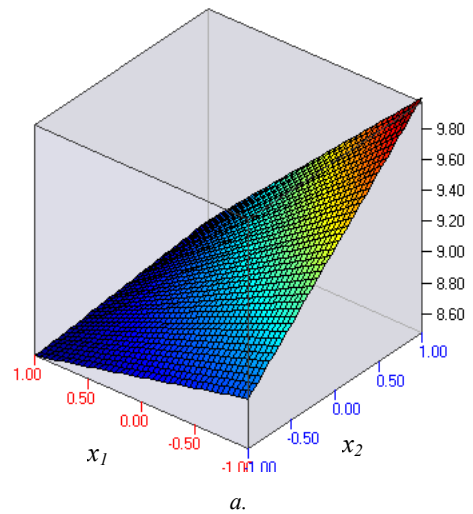
Влиянието на факторите е онагледено чрез сечения на хиперповърхнината на модела с различни хиперравнини (фиг. 9).

• **Регресионен модел на функцията Y6**

За регресионен модел на функцията Y6 е избран следния полином:

$$Y6 = 8.969 - 0.419x1 + 0.331x2 - 0.156x3 - 0.381x4 - 0.256x1x2 + 0.281x2x3 + 0.194x3x4 \quad (10)$$

Минимизирането на функцията Y6 съответства на минимална турбуленция в момента на излизане на палеца от канала на МК. От проведеня дисперсионния анализ е установено, че всички фактори имат съществено влияние върху тази целева функция, като относителната им тежест е в следната последователност: x_1 (ъгъл β), x_4 (линейния параметър c), x_2 (ъгъл α) и x_3 (линейния параметър a).



Фиг. 10 Сечения на хиперповърхнината на модела на Y6 с различни хиперравнини

За минимизиране на турбуленцията в момента на излизане на палеца от канала, е целесъобразно ъгъл β , линейните параметри c и a да бъдат максимални по стойност, а ъгъл α трябва да се минимизира. В съответствие с установената тежест на управляващите фактори са показани сечения на хиперповърхнината на модела на Y_6

с различни хиперравнини (фиг. 10а, б, в).

3.3. Резултати от оптимизацията

След провеждане на оптимизацията в съответствие с „Генетичен алгоритъм“ чрез системата QStatLab е получено:

Намерен Парето-Фронт:

No	VAR1	VAR2	VAR3	VAR4	OK	OBJ1	OBJ2	OBJ3	OBJ4
1	-0,9930	-0,2457	0,8750	0,9346	1	8,6354	10,7297	6,9655	8,8456
2	-0,9820	-0,9120	0,9990	0,9988	1	8,6408	9,6331	7,3011	8,2485
3	0,8039	-0,9952	0,9999	0,9998	1	10,7901	9,4258	8,3414	7,8839
4	-0,9996	0,8795	0,9018	1,0000	1	8,5079	12,5402	6,3394	9,7796
30	-0,9978	-0,0025	0,9660	0,9943	1	8,5635	11,1353	6,8084	9,0405
31	-0,6766	-0,9999	0,9998	0,9998	1	9,0132	9,4756	7,5174	8,1226
32	-0,9665	0,6588	0,9921	0,9977	1	8,5478	12,2256	6,4850	9,5950
33	-0,9990	0,5586	0,6101	0,9995	1	8,6021	11,8520	6,5472	9,4527
34	-0,7501	-1,0000	0,9990	0,9986	1	8,9257	9,4788	7,4768	8,1349
35	-0,9999	0,7245	0,7132	0,7182	1	8,6917	12,1991	6,5097	9,6724
36	-0,9895	0,5266	0,9935	0,9995	1	8,5260	12,0175	6,5291	9,4943
37	-0,9999	0,7013	0,9603	0,9375	1	8,5338	12,2930	6,4393	9,6559
38	-0,1267	-0,9993	0,9968	1,0000	1	9,6734	9,4562	7,8231	8,0343
39	0,9999	-1,0000	1,0000	1,0000	1	1,0249	9,4125	8,4500	7,8500
40	-0,9989	0,9603	0,9697	1,0000	1	8,4867	12,7226	6,2888	9,8679
41	0,9303	-0,9949	0,9928	0,9998	1	10,9421	9,4223	8,4109	7,8650
42	-0,9956	-0,6902	0,9962	0,9982	1	8,6089	10,0026	7,1747	8,4440
43	-0,2924	-0,9999	1,0000	0,9999	1	9,4741	9,4611	7,7311	8,0601
44	-1,0000	0,6726	0,7133	0,7744	1	8,6700	12,1153	6,5246	9,6179
45	-0,8074	0,4923	0,4116	0,9998	1	8,8943	11,5680	6,7964	9,2631
46	-0,9953	0,8375	0,8819	1,0000	1	8,5214	12,4561	6,3693	9,7361
47	-0,9967	0,6297	-0,0761	0,9945	1	8,7653	11,5369	6,5947	9,3601
48	1,0000	-0,9900	0,9692	0,9984	1	11,0276	9,4293	8,4474	7,8613
49	0,1877	-0,9996	0,9995	0,9996	1	10,0506	9,4438	7,9982	7,9824
50	-0,9997	0,0503	0,1028	0,9951	1	8,7622	10,9285	6,8815	9,0427

От намереният Парето-Фронт за оптимално решение е избрана комбинация №34, при която се наблюдава оптимално съчетаване на най-ниските стойности на целевите функции Y_1 , Y_3 , Y_5 и Y_6 . Получените оптимални стойности осигуряват най-ефективно гасене на ефекта от плискане на течността в контейнера.

Оптималните стойности в кодиран вид и съответстващите им натурални стойности са обобщени в табл. 3.

Оптимални геометрични параметри Таблица 3

Геометрични параметри	Кодирани	Натурални
Ъгъл β (x_1)	-0.7501	24.998 deg.
Ъгъл α (x_2)	-1	20 deg.
Линеен параметър a (x_3)	0.999	29.99 mm
Линеен параметър c (x_4)	0.9986	4.9972 mm

Общият вид на МК с нелинейни S-образни канали в съответствие с определените оптимални геометрични параметри на каналите е показан на фиг. 11.

С цел обобщаване на резултатите от проведеното изследване е направен сравнителен анализ на профила на вълната при плискане за различна геометрия на каналите на МК при един и същи мащаб (фиг. 12).

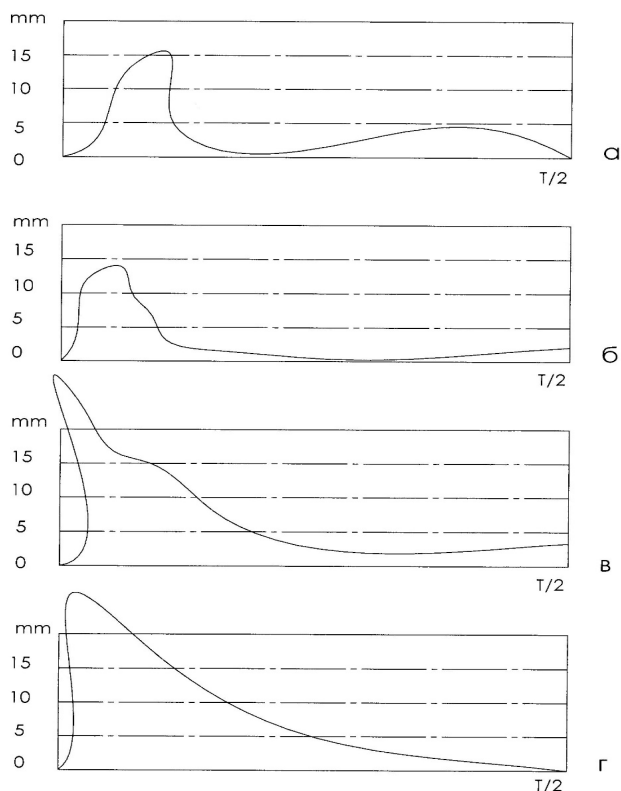


Фиг. 11 МК с S-образни канали с оптимални геометрични параметри

Обект на сравнение са:

- Теоретичен профил на ударена вълна според Grundelius [4] (фиг. 12а);
- Профил на вълната, получен от натурен експеримент с S – образен нелинеен канал (фиг. 12б);
- Профил на вълната, получен от натурен експеримент с произволен криволинеен канал (фиг. 12в);

- Профил на вълната, получен от натурен експеримент с прав канал (фиг. 12г).



Фиг. 12 Профили на вълни, съответстващи на различни канали

Последните две графики (в и г) се характеризират с високи стойности на горното отклонение на вълната. Очевидно, при МК с прав канал горното отклонение достига 25 mm, а при произволен криволинеен канал тази стойност е дори по-висока. Същевременно се наблюдава сходство в профила на вълната за първите две графики (а и б), което доказва ефективността от използване на S – образни нелинейни канали.

Обобщението на резултатите от проведеното изследване дава основание за издигане на следната хипотеза: Съществува геометрично подобие между профила на угасената вълна при блискането на флуида и профила на траекторията на точка от палеца при движение в криволинеен канал на МК.

Формулираната хипотеза може да се приложи за геометричен синтез на профила на S - образен канал на МК, намиращ приложение при каруселни опаковъчни системи за пренос на течни продукти.

4. ИЗВОДИ

- Разработена е методика за количествена оценка на ефекта от блискане при движение на каруселна система за пренос на контейнери с течности, базирана върху използване на високоскоростна камера;

- На основа на планиран експеримент са изведени регресионни модели на комплекс целеви функции за количествена оценка на блискането при движение на каруселна система за пренос на контейнери с течности в зависимост от геометричните параметри на S-образни канали на малтийския кръст;

- Формулирана е и е решена многоцелева оптимизационна задача, на основа на която са определени оптималните геометрични параметри на S-образните канали на малтийския кръст;

- Обоснована е хипотеза за наличие на геометрично подобие между профила на угасената вълна при блискането на флуида и профила на траекторията на точка от палеца при движение в криволинеен канал на МК, която може да се приложи за геометричен синтез на S-образен канал на МК, намиращ приложение при каруселни опаковъчни системи за пренос на течни продукти с минимален вискозитет.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Артоболовский, И. Механизмы в современной технике, Москва, Наука, (1970).
- [2] Белецкий, В., В. Благодарский, Б. Бройдо. Машины-автоматы и автоматические линии пищевой промышленности. Техника, Киев, (1967).
- [3] Вучков И. Н., И. И. Вучков. Програмен продукт QStatLab Professional, версия 5.4. Ръководство за потребителя, София, 2009.
- [4] Grundelius, M. Motion Control of Open Containers with Slosh Constraints. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, (1999).