WEB ISSN 2535-0013
PRINT ISSN 2535-0005

РОБАСНО ИНЖЕНЕРНО ПРОЕКТИРАНЕ И ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСА СУШЕНЕ НА ВЪЗДУШНИ ФИЛТРИ

ROBUST ENGINEERING DESIGN AND PAREMETTER OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF DRYING OF AIR FILTERS

Цоневска Ц., доц. д-р инж. Колева Е.
Институт по Електроника, Българска Академия на Науките, България
tsonevska@abv.bg, eligeorg@abv.bg

Abstract: *In this work the optimization of the drying process of air filters in an oven, based on experimental data, is considered. The influence of the variation of the process parameters: drying temperature, time of drying time and the weight the wet filters on the weight of the dry air filters is investigated. Robust engineering approach is implemented for the analysis of the drying process and the optimization of the quality indicator. Models for the mean value and the variance of the weight of the dry air filters are estimated for the case of repeated experimental observations. The parameter optimization aims minimization of the weight of the dry air filters, together with minimization of the variance of this quality characteristic. For obtaining the optimal solutions single- and multi-response techniques are applied.*

KEYWORDS*: ROBUST ENGINEERING APPROACH, MEAN AND VARIANCE MODELS ESTIMATION, PARAMETER OPTIMIZATION, DRYING AIR FILTERS.*

1. Увод

Във въздуха се съдържат различни примеси на прахови частици, газове, вредни микроорганизми и други, оказващи вредно влияние върху средата на производствените процеси на много отрасли от хранително-вкусовата, фармацевтичната промишленост и други, за които има високи изисквания за чистота. За да се предотврати тяхното попадане в произвежданите продукти, се предвижда поставянето на филтърни секции в оборудването, които задържат възможните замърсители на въздуха. Това гарантира подаването на чист въздух и поддържането на подходяща въздушна среда без наличието на вредни вещества и отговаряща на съответните регулаторни норми. Улавянето на замърсителите от въздуха е възможно посредством въздушни филтри, осигуряващи високоефективно пречистване на въздуха. Общите изисквания към тях обикновено са свързани с постигане на висока степен на задържане на примесите, ниско съпротивление, дълъг живот и малък обем, ниски експлоатационни и капиталови разходи. За автоматично следене чистотата на филтрите могат да се използват диференциални манометри, измерващи пада на налягането на въздуха на входа и на изхода им. При замърсяване на филтъра падът на налягането се увеличава и манометърът сигнализира за необходимостта от смяна му. Един филтър е годен за повторна употреба след преминаване на процеси на сушене и стерилизация при висока температура в сушилни, като в зависимост от вида на филтъра, той може да издържи до над 200 стерилизационни цикъла.

Робастното инженерство [1] изучава не само влиянието на параметрите на процеса, но и на грешките в тяхното задаване и външни смущаващи въздействия, които водят до вариация в стойностите на изследваните показатели на качеството. Смущенията при различните процеси се дължат на различни причини като производствени неточности, промяна на състава на суровините, промяна на машинни елементи и консумативи, промяна в околната среда, измервателни неточности, стареене и умора на материалите и т. н. Стойностите, които се задават на параметрите на процеса също варират в определени интервали [2-5], например поради ниско качество на суровини и материали и производствени неточности от различен тип (неточно дозиране, неточни измервания, лоша работа на машини и работници). Търсят се взаимодействията между параметрите на продукта и смущаващите въздействия с цел да се намерят такива стойности на параметрите, които правят продукта нечувствителен (robust) към смущенията. Това може да се постигне чрез експерименти или компютърно моделиране. Параметричното планиране е изключително ефективен метод за подобряване на качеството, защото позволява де се получи висококачествен продукт чрез избор на подходящи параметри на процеса.

Качеството на продукта се контролира чрез две статистически характеристики на показателя на качеството – математическо очакване (средна стойност) и дисперсия (вариация), за които се оценяват модели в зависимост от параметрите на процеса. Оценяването на регресионни модели за средното и дисперсията на показателите на качеството е възможно чрез повторни наблюдения [6] в точките на експерименталния план. В този случай се приема, че грешките в задаването на параметрите на процеса (факторите) са едни и същи при всички опити и следователно не могат да бъдат отчетени.

В тази статия се разглежда оптимизацията при сушенето на въздушни филтри на база на проведени експериментални опити. Разгледано е влиянието на изменението на параметрите на процеса: температура и време на сушене и тегло на омокрените филтри върху теглото на сухите и стерилизирани въздушни филтри. Приложен е робастен подход за анализ на процесите на сушене и стерилизация, целящ определянето на режими за получаване на минимално тегло на сухите филтри и минимална вариация на този показател на качеството, което ще гарантира по-високата възпроизводимост на резултатите при производствени условия и получаването на по-качествен продукт.

2. Описание на експеримента

В сушилен шкаф е проведено изследване за намиране на оптимални параметри за процеса на сушене на въздушни филтри, които се използват в оборудването при производство на продукти във фармацевтичната индустрия. По време на производствените процеси, свързани с използването на вакуум и неговото освобождаване, върху въздушните филтри кондензира влага, както и примеси на прахови частици, газове, вредни микроорганизми и други при взаимодействие с въздуха от околната среда, което е причина за тяхното омокряне. Вакуумът се използва за дозиране на материали в съответното оборудване, а също и за прехвърлянето на разтвора от едно оборудване в друго, в рамките на една и съща технологична схема. В резултат на това въздушните филтри предпазват продукта от замърсители от околната среда. Използването на сухи въздушни филтри осигурява качество на произвежданите продукти и редуцира риска от регулаторно несъответствие поради използване и съхранение на мокри филтри.

За провеждане на експеримента са използвани HIGH FLOW TETPOR II филтри за стерилизация за сгъстен въздух и газове, произведени от най-новите технологии със създадени производствени структури на мембраната на PTFE тефлон.

WEB ISSN 2535-0013
PRINT ISSN 2535-0005

Новото поколение филтри съчетава в себе си ефективност на работа, голяма пропускателна способност и голяма издръжливост.

Таблица 1. *План на експеримента и експериментално получени резултати*

№	Z_1	Z_2	Z_3	x_1	x_2	x_3	Средна стойност ($\bar{Y}$)	Дисперсия (s^2)
1	60	80	0,24549	-1	1	-0,27121	0,21883	0,00378
2	60	75	0,23761	-1	0	-0,79567	0,21547	0,00630
3	60	70	0,24901	-1	-1	-0,03694	0,23167	0,00345
4	120	80	0,24281	-0,25	1	-0,44958	0,21027	0,00399
5	120	75	0,26292	-0,25	0	0,88885	0,22485	0,00127
6	120	70	0,25180	-0,25	-1	0,14875	0,22406	0,000969
7	180	80	0,24663	0,5	1	-0,19534	0,20424	0,00237
8	180	75	0,25206	0,5	0	0,16606	0,20653	0,00147
9	180	70	0,26459	0,5	-1	1	0,21840	0,00457
10	160	80	0,26123	0,25	1	0,77637	0,21274	0,00446
11	160	75	0,23454	0,25	0	-1	0,20285	0,00134
12	160	70	0,24868	0,25	-1	-0,05890	0,20361	0,000827
13	220	80	0,25064	1	1	0,07155	0,20273	0,000841
14	220	75	0,25600	1	0	0,42829	0,20280	0,000924
15	220	70	0,25150	1	-1	0,12879	0,20465	0,00230

Касетите HIGH FLOW TETPOR II са валидирани като стерилизиращи филтри със задържаща способност 0.2 микрона, течен бактериален тест за ASTM838-05 на изискванията за 0.1 микрона.

Устройството на филтрите гарантира стерилността на процеса, дори в случаите при омокряне на мембраната на продукта като нейната особена структура може да издържи до 225 стерилизации на цикъла при 142 °C (287.6 °F). Комбинациите от поддържащи слоеве мембрана създават максимални предимства за работата на филтъра като непозволяват попадането на влакна в средата на процеса.

За основни фактори, влияещи върху процеса на сушене на въздушните филтри са избрани Z_1 време на сушене [min], Z_2 температура на сушене [ºC] и Z_3 тегло на омокрения филтър [g], а за изходна величина Y се приема теглото на въздушния филтър след сушене [g].

Изпълнен е експеримент с 15 различни комбинации на входните параментри, като за всяка от тях са направени по няколко повторни наблюдения (n_i), на база на които са изчислени оценки за средните стойности и дисперсиите на теглата на сухите филтри.

Матрицата на планирания експеримент в кодирани и натурални стойности на изследваните фактори влияещи върху целевата функция и стойностите на средното и дисперсията от получените резултати са представени в Таблица 1.

Основните нива на факторите, интервалите на изменението им и техните мерни единици са представени в Таблица 2.

Таблица 1. Основни нива и стъпки на вариране на факторите

Фактор (Z_i)	Размерност	Основно ниво (Z_{i0})	Стъпка на вариране (λ_i)	Долно ниво (Z_{imin})	Горно ниво (Z_{imax})
Z_1	min	140	80	60	220
Z_2	ºC	75	5	70	80
Z_3	g	0.249565	0.015025	0.23454	0.26459

Обработката на данните е извършена в кодиран мащаб, за да се избегнат проблеми, свързани с евентуална мултикулинеарност или други числени проблеми при оценяването на коефициентите на регресията и лошо предсказване на стойностите на показателя на качеството. Означенията x_1, x_2, x_3 в Таблица 1, както и в уравненията в Таблица 3, представляват кодираните в диапазон от -1 до 1 стойности на параметрите на процеса от експерименталните им диапазони (Таблица 2). Превръщането на натуралните (Z_i) в кодираните (x_i) стойности се извършва по формулата:

$$x_i = \frac{z_i - z_{i0}}{\lambda_i}, \qquad (1)$$

където λ_i е интервал на вариране на i-тия фактор:

$$\lambda_i = \left|Z_{i\min} - Z_{io}\right| = \left|Z_{i\max} - Z_{io}\right|. \qquad (2)$$

3. Модели при робастен подход

Оценените средни стойности $\bar{Y}$ и дисперсиите s^2 (Таблица 1) на сухите въздушни филтри могат да се разглеждат като две изходни величини и могат да се оценят регресионни модели за тях, чрез метода на най-малките квадрати. По този начин се получават модели за средната стойност и дисперсията на показателите на качеството [1]:

$$\tilde{\bar{y}}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{k_y} \hat{\theta}_{yi} f_{yi}(\vec{x}) \qquad (3)$$

$$\ln\left(\tilde{s}^2(\vec{x})\right) = \sum_{i=1}^{k_\sigma} \hat{\theta}_{\sigma i} f_{\sigma i}(\vec{x}), \qquad (4)$$

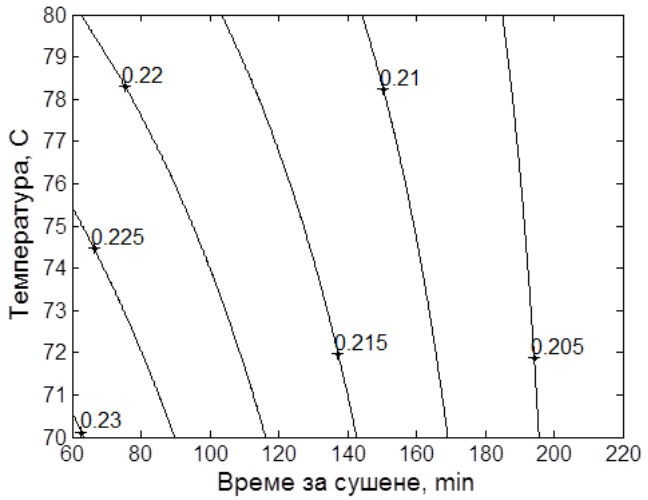
където $\hat{\theta}_{yi}$ и $\hat{\theta}_{\sigma i}$ са оценки на регресионните коефициенти, а f_{ui} и $f_{\sigma i}$ са известни функции на параметрите на x_i. Дисперсията на нормално разпределени наблюдения има χ^2-разпределение. Използването на логаритмична трансформация на функцията за дисперсия я апроксимира с нормално разпределение, което подобрява ефикасността на оценките на регресионните коефициенти.

Оценените модели за средната стойност и за логаритъма на дисперсията, заедно с коефициентите на детерминация R^2 и R^2_{adj}, които са мерки за точността на модела са представени в Таблица 3.

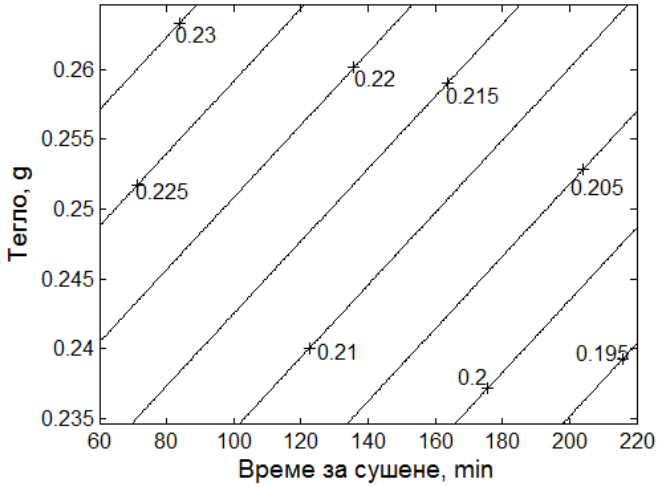
Таблица 3. Модели за средната стойност и за логаритъма на дисперсията

		R^2	R^2_{adj}
$\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$	$\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$ = 0.21301074-0.01245685x_1-0.00249659x_2+0.00901871x_3+0.00265851x_1x_2	0.91239	0.87735
$\ln\left(\tilde{s}^2(\vec{x})\right)$	$\ln\left(\tilde{s}^2(\vec{x})\right)$= -3.652485+1.304054$x_2$+ 0.96438336$x_2^2$+1.033739$x_3^2-0.97579282x_1^3$+2.3248464$x_1$x3-0.61158611$x_2x_3-1.901226x_1^2x_2$	0.95897	0.91793

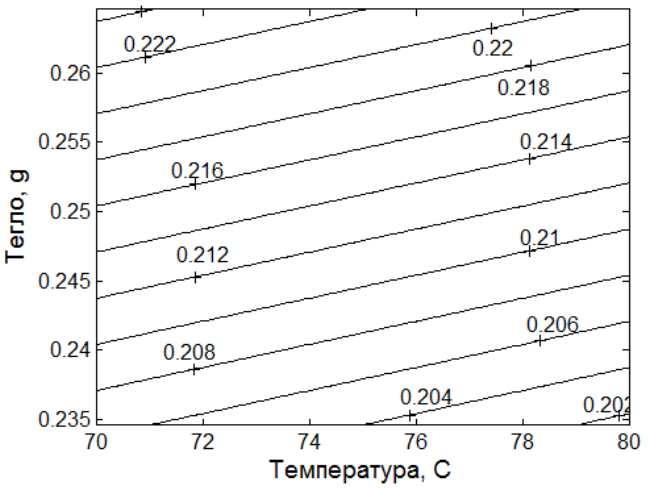
WEB ISSN 2535-0013
PRINT ISSN 2535-0005



Фиг. 1. *Контурна графика на средната стойност на теглото на сухия филтър* $\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$ *в зависимост от времето на сушене* Z_1 *и температура на сушене* Z_2*, при тегло на омокрения филтър* Z_3 *= 0.249565 g.*



Фиг. 2. *Контурна графика на средната стойност на теглото на сухия филтър* $\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$ *в зависимост от времето на сушене* Z_1 *и тегло на омокрения филтър* Z_3 *при температура на сушене* Z_2 *= 75 ºC.*



Фиг. 3. *Контурна графика на средната стойност на теглото на сухия филтър* $\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$ *в зависимост от температура на сушене* Z_2 *и теглото на омокрения филтър* Z_3*, при време на сушене* Z_1 *= 140 min.*

Получените модели са много добри, с високи стойности на коефициентите на детерминация при ниво на значимост 0.05 и могат да се използват за параметрична оптимизация на параметрите на сушене и стерилизация на въздушни филтри. На Фиг. 1 – Фиг. 3 са представени контурни графики на средните стойности на теглото на сухите филтри, в зависимост от различни комбинации на параметрите на процеса сушене и стерилизация.

От контурните графики се наблюдава, че температурата (Z_2) не е определяща върху показателя на качеството ($\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$), съществена е зависимостта между времето на сушене (Z_1) и теглото на омокряне на филтрите (Z_3). Най-добри резултати се получават при високи стойности на времето за сушене и ниски стойности на теглото на омокрените филтри.

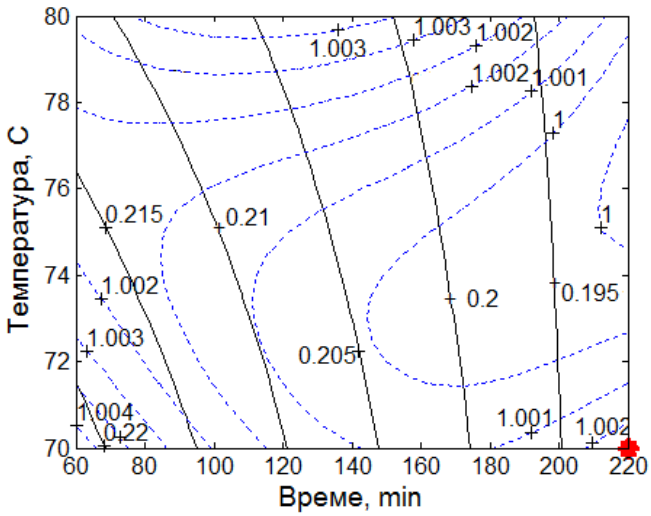
4. Оптимизация

Оценените модели за средната стойност и за дисперсията на теглото на сухите филтри в зависимост от параметрите на процеса са използвани за установяване на параметрите, при които тези показатели на качеството имат минимални стойности. Получените оптимални параметри на процеса са представени в Таблица 4 и графично изобразени на Фиг. 5 и Фиг. 6. Може да се види, че минимално тегло на въздушните филтри се получават при време за сушене Z_1=220 min, при температура Z_2=80 °C и тегло на омокрения филтър Z_3=0.2345 g, за които очакваните стойности на показателя на качеството тегло на сухия филтър е $\tilde{\bar{y}}(\vec{x})_{\min}$,=0.1914 g. Минимална дисперсия $\tilde{s}^2(\vec{x})_{\min}$=0.9979 на теглата на сухите филтри се получава при други параметри на процеса: време за сушене Z_1=60 min, при температура Z_2=76 °C и тегло на омокрения филтър Z_3=0.2646 g.

Следователно, ако се цели едновременното оптимизиране и на двата критерия – средната стойност и дисперсията на сухите въздушни филтри е необходимо прилагане на метод за многокритериална оптимизация.

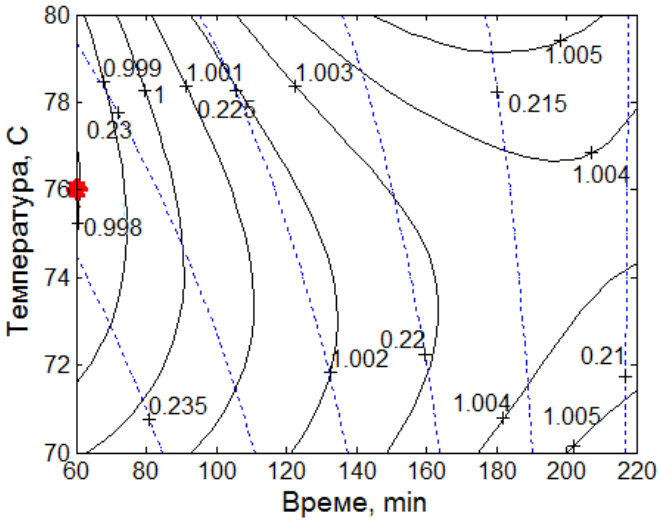
Таблица 4. Оптимални параметри на процеса

Модел	Z_{1opt}, min	Z_{2opt}, °C	Z_{3opt}, g	$\tilde{\bar{y}}(\vec{x})_{\min}$, g	$\tilde{s}^2(\vec{x})_{\min}$, g
$\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$	220	70	0.2345	0.1914	-
$\tilde{s}^2(\vec{x})$	60	76	0.2646	-	0.9979

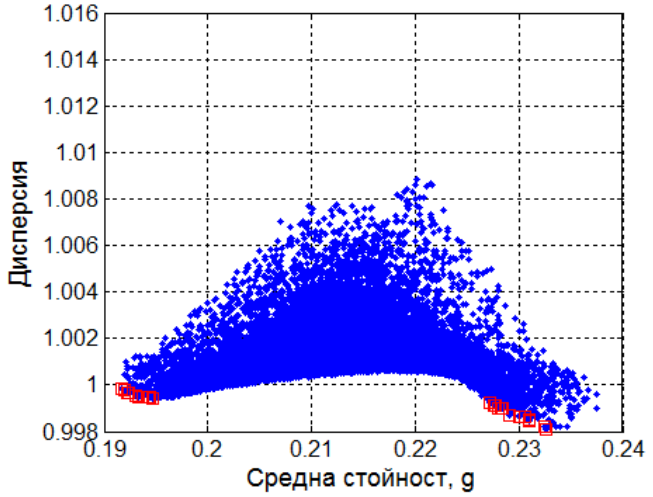


Фиг. 4. *Оптимизация на средната стойност на тегло на сухия филтър* $\tilde{\bar{y}}(\vec{x})$ *при* Z_{3opt}*=0.2345 g (непрекъснати линии) и контурни линии на дисперсията (прекъснати линии).*

WEB ISSN 2535-0013
PRINT ISSN 2535-0005



Фиг. 5. *Оптимизация на дисперсията на тегло на сухия филтър* $\tilde{s}^2(\vec{x})$ *при* Z_{3opt}*=0.2646 g (непрекъснати линии) и контурни линии на средната стойност (прекъснати линии)*



Фиг. 6. *Парето-фронт*

Таблица 5. Парето-оптимални решения

№	Z_{1opt}, min	Z_{2opt}, °C	Z_{3opt}, g	$\tilde{\bar{y}}(\vec{x})_{opt}$, g	$\tilde{s}^2(\vec{x})_{opt}$, g^2
1	63.19957	78.33676	0.26362	0.23003	0.99861
2	60.21614	77.98450	0.25903	0.22804	0.99899
3	218.24445	75.64017	0.23851	0.19420	0.99947
4	62.62788	77.49397	0.25946	0.22847	0.99898
5	62.55300	76.48725	0.26192	0.23098	0.99847
6	219.95864	76.24299	0.23960	0.19462	0.99941
7	61.20277	78.32899	0.25914	0.22762	0.99912
8	61.10968	76.08572	0.26371	0.23267	0.99811
9	61.11667	79.31527	0.26004	0.22716	0.99924
10	218.25054	75.25120	0.23531	0.19228	0.99965

При многокритериалната оптимизация се цели едновременно оптимизиране няколко целеви функции. В повечето случаи не съществува една алтернатива, която да оптимизира всички критерии. Съществува обаче множество от недоминирани алтернативи, наречено Парето-оптимално множество, всеки елемент, от което може да бъде решение на многоцелевата задача от математическа гледна точка.

След извършване на оптимизацията може да се намери най-доброто решение, като се разглеждат координатите на Парето-оптималните решения. Всяко от тях има свойството, че изменението му с цел да подобри един критерий води до влошаване на поне един от останалите критерии. Всички Парето-оптималните решения (образуващи Парето-фронт) са възможни компромисни решения като изборът между тях може да се осъществи на база допълнителни критерии за оптимизация или по преценка на съответния експертен персонал.

На Фиг. 6 е представен получения Парето-фронт на база на 10000 генерирани комбинации на параметрите на процеса сушене и стерилизация. В Таблица 5 са представени някои от получените Парето-оптимални решения – параметрите на процеса и получените оптимални решения за средната стойност и дисперсията на теглото на сухите филтри. Изборът между тези решения е компромисен избор в зависимост от това, кои параметри на процеса са по-икономични, дали средната стойност или дисперсията е целесъобразно да бъдат отчетени с по-голям тегловен коефициент.

5. Заключение

В настоящата работа е разгледано оптимизирането на процеса на сушене на въздушни филтри чрез робастен инженерен подход. Изследвано е влиянието на изменението на параметрите на процеса температура и време на сушене, както и теглото на омокрените въздушни филтри върху теглото на сухия филтър. Установено е, че върху средната стойност на показателя на качеството определящо влияние имат времето на сушене и теглото на омокрените филтри, като температурата не оказва съществено значение. В резултат на това минимално тегло на сухия филтър се получава при високи стойности на времето и ниски стойности на теглото на омокрените филтри. Оценени са модели на средната стойност, и дисперсията на изследвания показател на качеството. Намерени са Парето-оптимални компромисни решения за параметрите на процеса, при които се минимизират едновременно средната стойност и дисперсията на теглото на сухите филтри. Разглеждането на процеса е тясно свързано с оборудването в което се извършва, видът на филтрите както и от изменението на параметрите на процеса при конкретния проведен експеримент.

Литература

[1]. Vuchkov I. N, Boyadjieva L. N., Quality improvement with design of experiments, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2001.

[2]. Petrova D., E. Koleva, I. Voutchkov. Model-Based Robust Parametric Design of Automatic Cleaning Process. Journal of Pharmaceutical Innovation, March 2012, Volume 7, Issue 1, pp 30-37. DOI 10.1007/s12247-012-9120-3, ISSN: 1872-5120; Online ISSN: 1939-8042, Publisher Springer US, (2012).

[3]. Koleva E., I. Vuchkov. Multiresponse robust engineering: industrial experiment parameter estimation. Advances in Data Analysis: Theory and Applications to Reliability and Inference, Data Mining,Bioinformatics, Lifetime Data, and Neural Networks , Ed. C. H. Skiadas, Birkhäuser Boston, a part of Springer Science+Business Media, LLC 2010, 337-344. ISBN 978-0-8176-4798-8, e-ISBN 978-0-8176-4799-5, DOI 10.1007/978-0-8176-4799-5, (2010).

[4]. Koleva E., I. Vuchkov, Model-based approach for quality improvement of EBW applications in mass production, Vacuum 77, (2005), 423-428.

[5]. Koleva E., I. Vuchkov, K. Velev. Multiresponse Robust Engineering: Case with Errors in Factor Levels. PLISKA Studia Mathematica Bulgarica, 19, (2009), 193-206. ISSN 0204-9805, (2009)

[6]. Koleva E., L. Koleva, V. Tzotchev, M. Nemtanu, M. Brașoveanu, K. Vutova. Robust engineering approach for optimization of electron beam grafting of corn starch. Science, Engineering & Education, v.1(1), 2016, ISSN 2534-8507, (ISSN 2534-8515 online)