

МНОГОФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТА РОТОРНОГО ТИПА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Корзан С. И., аспирант;

Ловкис З. В., заслуженный деятель науки Республики Беларусь, член-корр. НАН
Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор

*РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по
продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработка и внедрение в пищевую промышленность современных высокопроизводительных и эффективных устройств для обеззараживания жидкостей, в частности воды питьевой, является актуальным направлением научных исследований. В статье приведены результаты экспериментальных исследований аппарата роторного типа с применением полного факторного эксперимента, с помощью которого определены оптимальные технологические и конструкционные параметры аппарата. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании кавитационных нагревателей для нагрева жидкостей.

Ключевые слова: вода, обеззараживание, нагрев, планирование, фактор, параметр оптимизации, продолжительность обработки, затраты электроэнергии

MULTIFACTOR EXPERIMENT ON OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL AND DESIGN PARAMETERS OF ROTOR TYPE APPARATUS FOR WATER DISINFECTIION

Korzan S.I., Lovkis Z. V.

*RUE «Scientific and Practical Centr of the National Academy of Sciences of Belarus for Food»,
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. The development and implementation of modern high-performance and effective devices for the disinfection of liquids, in particular drinking water, in the food industry is an actual area of scientific research. The article presents the results of experimental studies of a rotary-type apparatus using a full factorial experiment, with which the optimal technological and structural parameters of the apparatus are determined. The results can be used in the design of cavitation heaters for heating liquids.

Keywords: water, disinfection, heating, planning, factor, optimization parameter, processing time, energy costs

Введение. Подготовка воды для нужд потребления человеком и использования ее в пищевой промышленности сложный и необходимый процесс. Технология подготовки воды в основном включает в себя следующие этапы: забор воды из скважины, грубая механическая очистка, обезжелезивание, умягчение, удаление привкусов и запаха, тонкая очистка, обеззараживание [1].

Технология обеззараживания воды подразумевает подавление болезнетворных бактерий, вирусов и простейших микроорганизмов, вызывающих инфекционные заболевания. Источниками возникновения микроорганизмов в воде являются загрязнение инородными телами в процессе ее водоподготовки, некачественное обеззараживание и несоблюдение санитарного состояния оборудования [2].

На данном этапе развития обеззараживание воды термообработкой осуществляется различным оборудованием. Нагреватели классифицируют по режиму работы (емкостные и

проточные) и способу воздействия (косвенного и прямого). Основная масса применяемых в перерабатывающей промышленности нагревателей – емкостные аппараты косвенного воздействия. Нагрев в данных аппаратах осуществляется промежуточными теплоносителями: горячей водой, водно-солевым раствором, паром, горячим воздухом, топочными газами. В последнее время нашли широкое применение электрические установки косвенного воздействия, в которых нагрев жидкости осуществляется ТЭНами.

В аппаратах прямого воздействия нагрев осуществляется без промежуточного теплоносителя облучением в поле сверхвысоких частот кавитационными или электродными нагревателями. Особое внимание среди этой группы представляют кавитационные нагреватели (гидродинамические и гидростатические) из-за компактности и простоты узла нагрева и достаточно высокого КПД [3, 4].

С целью повышения эффективности процесса обработки необходимо определить оптимальные технологические и конструкционные параметры аппарата роторного типа, позволяющие получить продукт безопасный в эпидемиологическом отношении, безвреден по химическому составу и иметь благоприятные свойства [5 – 7]. Такую задачу позволяет решить полный факторный эксперимент [8 – 12].

Основная часть. Теоретические исследования и поисковые эксперименты показали, что в процессе обработки воды в аппарате роторного типа наиболее значимыми являются два фактора: частота вращения ротора n (мин^{-1}) и диаметр полусферических ячеек ротора $d_{я}$ (мм). Исследование совместного воздействия этих факторов на минимальную продолжительность нагрева и затрат электроэнергии позволит получить опытно-статическую модель, с помощью которой будут получены параметры оптимизации.

Численные значения фактора «частота вращения ротора» (n , мин^{-1}) выбраны исходя из поисковых исследований, а также технических характеристик электродвигателя аппарата роторного типа [13].

Диапазон варьирования значений фактора «диаметр полусферических ячеек ротора» ($d_{я}$, мм) определялся на основании теоретических исследований и конструкционных возможностей аппарата роторного типа.

В качестве критерия оптимизации были приняты два параметра: минимальное время обработки воды в аппарате роторного типа и минимальные затраты электроэнергии. Интервалы и уровни варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Интервалы и уровни варьирования факторов

Факторы	1-й фактор (n)		2-й фактор ($d_{я}$)	
	x_1 , мин^{-1}	X_1	x_2 , мм	X_2
Нижний уровень	$x_{1\min} = 2000$	-1	$x_{2\min} = 40$	-1
Верхний уровень	$x_{1\max} = 3000$	+1	$x_{2\max} = 50$	+1
Основной уровень	$x_{10} = 2500$	0	$x_{20} = 45$	0
Интервал варьирования	$\Delta x_1 = 500$	-	$\Delta x_2 = 5$	-
Формулы взаимосвязи натуральных значений факторов x_1 и x_2 с нормированными X_1 и X_2	$X_1 = \frac{x_1 - 2500}{500}; \quad x_1 = 2500 + 500 \cdot X_1$ $X_2 = \frac{x_2 - 45}{5}; \quad x_2 = 45 + 5 \cdot X_2$			

Для описания продолжительности обработки воды и минимальных затрат электроэнергии использовали ортогональный центральный композиционный план, состоящий из центрального полного факторного плана и $2k$ звездных точек $(\pm\alpha_k, 0, 0), \dots, (0, 0, \pm\alpha_k)$ (по две звездные точки на каждый фактор).

Количество опытов с учетом звездных точек:

$$N_k = N_{k0} + 2 \cdot k + n_0, \quad (1)$$

где N_{k0} – число опытов в эксперименте ($N_{k0} = 2^k$);

k – число факторов;

n_0 – количество опытов в центре плана. В центре плана – один опыт. Это точка факторного пространства с координатами (0, 0, 0).

Тогда количество опытов равно

$$N_k = 2^2 + 2 \cdot 2 + 1 = 9.$$

Величина звездного плеча α_k вычислялась по формуле [12]:

$$\alpha_k = \pm \sqrt{\frac{\sqrt{N_k \cdot N_{k0}} - N_{k0}}{2}}, \quad (2)$$

Подставляя значения в формулу (2), получили величину звездного плеча $\alpha_k = \pm 1,00$.

Эксперимент проводился с трехкратной повторностью ($n = 3$).

По заданным диапазонам варьирования факторов была составлена матрица планирования для двух параметров оптимизации (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица планирования

N_k	X_{1j}	X_{2j}	x_{1j}	x_{2j}	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	\bar{Y}_1	S_1^2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	\bar{Y}_2	S_2^2
1	-1	-1	2000	40	97	103	98,5	99,5	9,75	5,9	6,0	6,1	6	0,01
2	+1	-1	3000	40	23	25	27	25	4	3,8	3,5	3,2	3,5	0,09
3	-1	1	2000	50	63	63	66	64	3	5,2	4,3	4,6	4,7	0,21
4	+1	1	3000	50	19,5	21,5	17,5	19,5	4	3,2	2,5	3,0	2,9	0,13
5	0	0	2500	45	25	24,5	27	25,5	1,75	2,7	2,0	2,2	2,3	0,13
6	-1,00	0	2000	45	63	57	60	60	9	3,7	4,2	3,5	3,8	0,13
7	+1,00	0	3000	45	14	13	16	14,3	2,33	2,0	1,8	2,5	2,1	0,13
8	0	-1,00	2500	40	47	49,5	46	47,5	3,25	4,5	3,9	4,2	4,2	0,09
9	0	+1,00	2500	50	31	34,5	35	33,5	4,75	3,6	2,8	3,2	3,2	0,16

Математическая модель изучаемых процессов записана уравнением в виде [12, 14]:

$$Y_{1(2)} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} (X_1^2 - \lambda_k) + b_{22} (X_2^2 - \lambda_k). \quad (3)$$

где $Y_{1(2)}$ – параметры оптимизации процесса;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коэффициенты многофакторного уравнения регрессии;

X_1, X_2 – значение уровней факторов, влияющих на процесс;

λ_k – ортогонализирующий коэффициент квадратичного числа X_i^2 , вводимый для обеспечения ортогональности плана:

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{N_{k0}}{N_k}}. \quad (4)$$

Количество оцениваемых параметров опытно-статической модели определяли по формуле [15]:

$$B_k = \frac{(k+1)(k+2)}{2} = \frac{(2+1)(2+2)}{2} = 6. \quad (5)$$

Описание математической модели продолжительности обработки воды и затрат электроэнергии проводились в программах: MicrosoftExcel 2016, StatGraphicsPlus 5.0, Statistica 10.

Результаты и их обсуждение. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие в стандартизованных переменных зависимость исследуемых показателей от выбранных факторов. Влияние факторов на параметр оптимизации отражали в виде карты Парето и главных эффектов отклика. Графические модели влияния факторов на параметр оптимизации представляли в виде поверхности отклика и контурного графика поверхности отклика на плоскости [16].

Результаты регрессионного анализа продолжительности обработки воды и затрат электроэнергии представлены на рисунках 1 – 4.

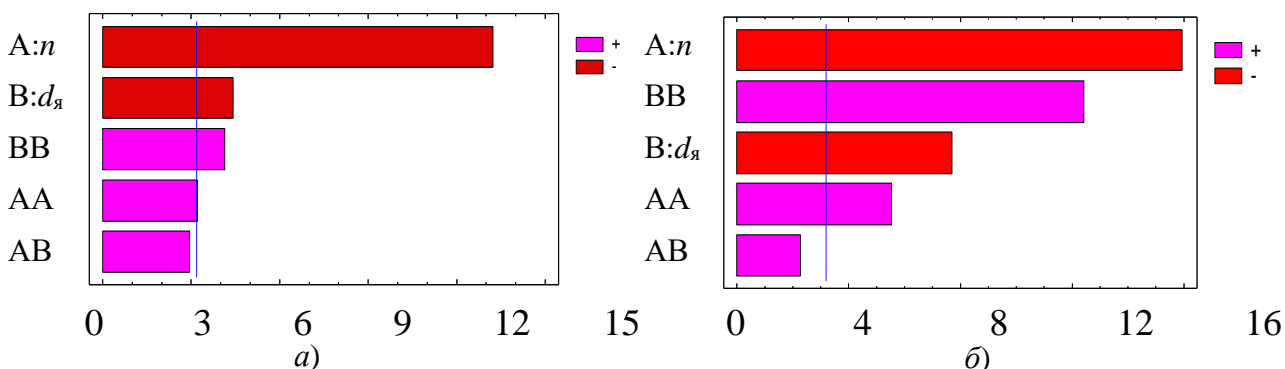


Рисунок 1 – Стандартизированные карты Парето для параметра продолжительность обработки (a) и затрат электроэнергии (б)

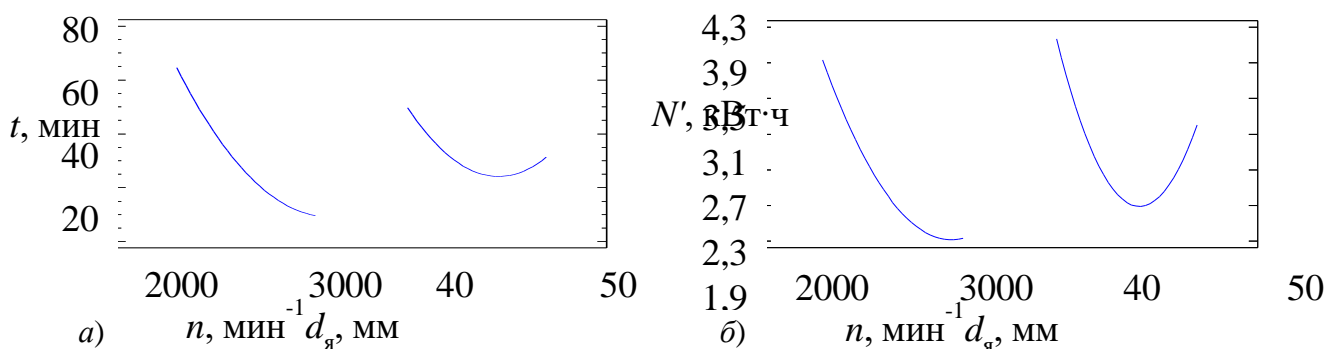


Рисунок 2 – Главные эффекты отклика для параметра продолжительность обработки (a) и затрат электроэнергии (б)

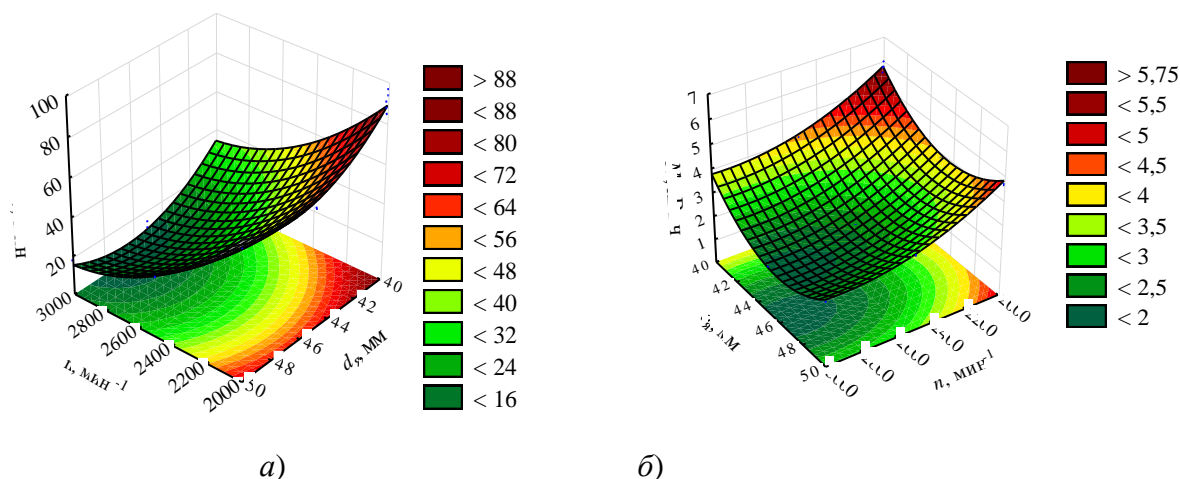


Рисунок 3 – Поверхности отклика для параметра продолжительность обработки (а) и затрат электроэнергии (б)

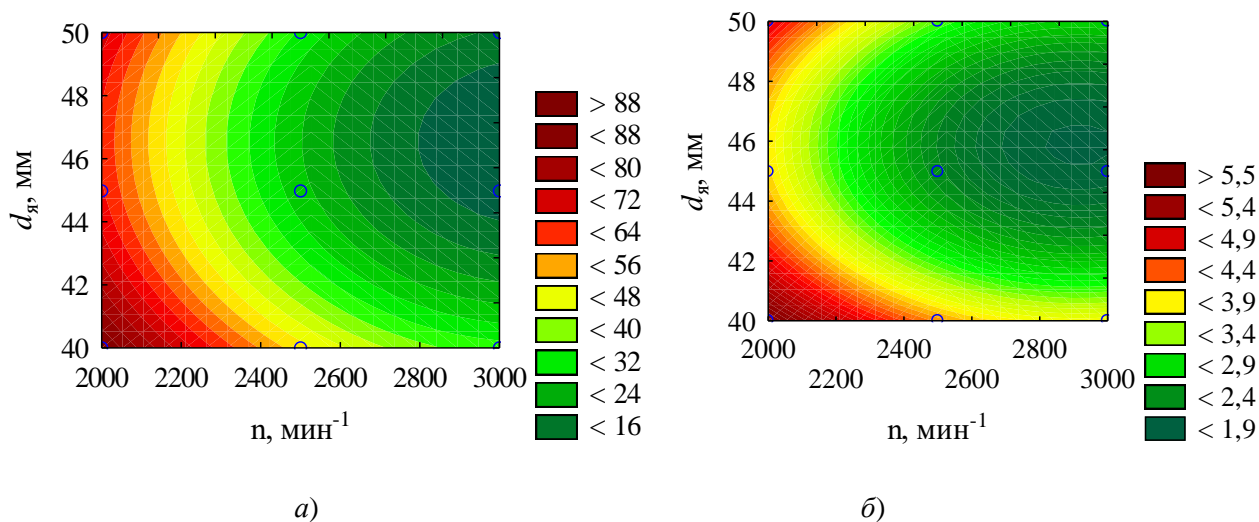


Рисунок 4 – Контурные графики поверхности отклика для параметра продолжительность обработки (а) и затрат электроэнергии (б)

Анализ результатов, представленных на рисунках 1 – 4, показывает, что повышение частоты вращения ротора n и диаметра ячеек ротора d_r снижает продолжительность обработки воды t и затраты электроэнергии N' .

В результате анализа экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие влияния частоты вращения ротора и диаметра полусферических ячеек на продолжительность обработки воды и затраты электроэнергии, соответственно:

$$Y_1 = 43,2 + 27,44X_1 - 9,17X_2 + 11,56(X_1^2 - 2/3) + 14,89(X_2^2 - 2/3); \quad (6)$$

$$Y_2 = 3,63 - 1X_1 - 0,48X_2 + 0,6(X_1^2 - 2/3) + 1,35(X_2^2 - 2/3). \quad (7)$$

В результате обработки полученных моделей с помощью программы Microsoft Excel 2016 найдены оптимальные значения рассматриваемых факторов в нормируемых значениях (таблица 3). Переход от нормированных значений факторов X к натуральным значениям x осуществляли по формулам (49 – 52) [15].

Таблица 3 – Значение факторов и параметров оптимизации

Параметр оптимизации		Факторы			
		Частота вращения ротора, n		Диаметр полусферических ячеек ротора, $d_{\text{я}}$	
		$X_{1\text{опт}}$	$x_{1\text{опт}}$	$X_{2\text{опт}}$	$x_{2\text{опт}}$
Y_1	$t = 7,87$ мин	1,1875	$3093,8 \text{ мин}^{-1}$	0,3078	46,54 мм
Y_2	$N' = 1,87$ кВт·ч	0,8333	$2916,7 \text{ мин}^{-1}$	0,1790	45,9 мм

Для получения функции отклика в зависимости от натуральных значений факторов декодировали уравнения регрессии (6) и (7). После замены факторов и математических преобразований получили аналитические зависимости продолжительности обработки воды и затрат электроэнергии от конструкционных и технологических параметров в натуральных значениях:

$$t = 4,62 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 + 0,6 \cdot d_{\text{я}}^2 - 0,29 \cdot n - 55,4 \cdot d_{\text{я}} + 1740,4; \quad (8)$$

$$N' = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,054 \cdot d_{\text{я}}^2 - 0,014 \cdot n - 4,96 \cdot d_{\text{я}} + 136,03, \quad (9)$$

где t – продолжительность обработки воды, мин;

N' – затраты электроэнергии, кВт·ч;

n – частота вращения ротора, мин^{-1} ;

$d_{\text{я}}$ – диаметр полусферических ячеек ротора, мм.

Работоспособность моделей влияния конструкционных и технологических параметров на продолжительность обработки воды и затраты электроэнергии подтверждается коэффициентами детерминации, соответственно, $R^2 = 98,71 \%$ и $R^2 = 99,41\%$.

Заключение. По результатам проведения полного факторного эксперимента установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на продолжительность обработки воды и затраты электроэнергии, являются частота вращения ротора n и диаметр полусферических ячеек ротора $d_{\text{я}}$.

Полученные модели позволяют определить направленность влияния факторов и их взаимодействий, а также определить оптимальные технологические и конструкционные параметры аппарата роторного типа: частота вращения ротора $n = 3000 \pm 90 \text{ мин}^{-1}$ и диаметр полусферических ячеек ротора $d_{\text{я}} = 46,22 \pm 0,32$ мм, при которых достигается рабочая температура $T = 80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ для подавления микроорганизмов при минимальной продолжительности обработки воды $t = 7,87$ мин и затратах электроэнергии $N' = 1,87$ кВт·ч.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Водоподготовка: справочник / под ред. С. Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
2. Краснова, Т. А. Экспертиза питьевой воды. Качество и безопасность: учеб. пособие / Т. А. Краснова, В. П. Юстратов, В. М. Позняковский. – М.: ДеЛи принт, 2011. – 279 с.
3. James L Griggs. Hydrosonic Pump [Electronic resource] // Rex Research the Civilization Kit. Mode of access: <http://rexresearch.com/griggs/griggs.htm>. Date of access: 24.09.2019.
4. Economic Benefits of Utilizing Controlled Cavitation Technology for Black Liquor Oxidation and Heating [Electronic resource] / J. Frederick [et al.] // TAPPI Journal. – 2002. – Mode of access: <https://www.google.by/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwic1PSoyofAhVTqHEKHUaUDUMQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hydrodynamics.com%2Fapp%2Fdownload%2F6465129004%2FConference%2BPaper%2B-%2BBlack%2BLiquor%2BOxidation.pdf&usq=AOvVaw0KqmA-rrt6u2--8mnLhNpJ>. – Date access: 24.09.2019.
5. Древин, В. Е. Определение качества воды и ее использование в пищевой промышленности / В. Е. Древин, Т. А. Шапаева, Г. Л. Гиззатова // Пищевая промышленность. – 2014. – № 9. – С. 34–35.
6. Закатов, В. Н. Отбор проб для санитарно-токсикологических исследований / В. Н. Закатов, С. А. Полянская, В. Е. Ларин // Контроль качества продукции. – 2019. – № 3. – С. 39–42.
7. Оценка качества питьевой воды по результатам расширенных мониторинговых исследований и ее

- химической безопасности / М. Ю. Вожаева [и др.] // Гигиена и санитария. – 2018. – № 97 (2). – С. 117–124.
8. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования эксперимента / Ю. П. Грачев, Ю. М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
9. Абомелик, Т. П. Методология планирования эксперимента: сборник лабораторных работ / Т. П. Абомелик. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 35 с.
10. Хамханов, К. М. Основы планирования эксперимента. Методическое пособие для студентов специальностей 190800 «Метрология и метрологическое обеспечение» и 072000 «Стандартизация и сертификация (по отраслям пищевой промышленности)» / К. М. Хамханов. – Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2001. – 94 с.
11. Кошак, Ж. В. Моделирование и оптимизация технологических процессов зерноперерабатывающей и хлебопекарной промышленности: учеб. пособие / Ж. В. Кошак, А. Э. Кошак. – Минск: ИВЦ Минфина, 2015. – 152 с.
12. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования: учебно-методический комплекс / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.
13. Электродвигатели 4А, 4АМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electronpro.ru/electrodvigateli-4a-4am>. – Дата доступа: 24.09.2019.
14. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
15. Леонов, А. Н. Основы научных исследований в примерах и задачах: учеб.-метод. пособие / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис; под ред. А. Н. Леонова. – Минск: БГАТУ, 2013. – 136 с.
16. Ланкин, А. М. Планирование эксперимента в научных исследованиях: метод. указания к лаб. Работам / А. М. Ланкин, М. В. Ланкин, Д. В. Шайхутдинов. – Новочеркасск: ЮРГПУ им. М.И. Платонова, 2015. – 42 с.