

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.8

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-5-73-77

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ
В ПОГРУЖНЫХ МОЕЧНЫХ МАШИНАХ**ПЕТРИК ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ**✉, аспирант¹

petrick.dmitry2016@yandex.ru✉

КОРНЕЕВ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент¹

tsmo@rgau-msha.ru

ПЕТРИК ВЛАДИСЛАВ ЮРЬЕВИЧ, студент²

mrpetryke@gmail.com

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Московский колледж транспорта; 129626, Российская Федерация, г. Москва, Кучин переулок, д. 14

Аннотация. Анализ условий работы сельскохозяйственной техники показал, что основными загрязнителями деталей являются сочетание остатков почвы с растительными и другими органическими материалами и смесь нефтепродуктов различного происхождения. С целью выявления наиболее эффективного и экономичного режима очистки деталей проведен эксперимент, учитывающий три фактора: длительность мытья, температуру моющего раствора, концентрацию водного раствора моющих компонентов. Критерием оптимизации выбран процент смытого загрязнения. Создана матрица реализации плана полнофакторного эксперимента. Очистка образцов, представляющих собой трубу квадратного профиля размером 50 × 50 мм, длиной 50 мм, осуществлялась с помощью погружной моечной машины в виде малогабаритной ультразвуковой ванны Specos V-100. В качестве моющего средства использовался раствор, состоящий из карбоната натрия и смеси поверхностно-активных веществ в пропорции 9:1. Режимы ультразвуковой очистки менялись в соответствии с варьированием трех факторов в следующих диапазонах: длительность процесса очистки – от 5 до 15 мин, температура моющего раствора – от 40 до 80°C; концентрация водного раствора моющих компонентов – от 5 до 25 г/л. Воспроизводимость результатов эксперимента подтверждена с помощью критерия Кохрена. Значимость коэффициентов регрессии определена с помощью критерия Стьюдента. Модель подтверждена с помощью критерия Фишера. На основе уравнения регрессии построены поверхности отклика, в которых зависимости чрезвычайно близки к линейным. Сделан вывод о том, что при продолжительности процесса мойки 12 мин, температуре моющего раствора 70°C и концентрации водного раствора моющих компонентов 20 г/л процент смытого загрязнения является максимальным.

Ключевые слова: ультразвуковая очистка, эффективность, интенсификация, критерии, оптимизация, загрязнение, поверхность отклика

Формат цитирования: Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 5. С. 73-77. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>.

© Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю., 2022



ORIGINAL PAPER

INTENSIFYING THE PROCESS OF CLEANING PARTS IN SUBMERSIBLE
WASHING MACHINES**DMITRY Yu. PETRIK**, PhD student¹

petrick.dmitry2016@yandex.ru

VIKTOR M. KORNEEV, PhD (Eng), Associate Professor¹

tsmo@rgau-msha.ru

VLADISLAV Yu. PETRIK, student²

mrpetryke@gmail.com

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation² Moscow College of Transport; 14, Kuchina Lane, Moscow, 129626, Russian Federation

Abstract. An analysis of the working conditions of agricultural machinery showed that the main contaminants of parts include a combination of soil residues with plant and other organic materials and a mixture of petroleum products of various origins. To identify the most efficient and cost-effective mode for cleaning parts, the authors conducted an experiment that takes into account three factors: the duration of washing, the temperature of the washing solution, and the concentration of the aqueous solution of detergent

components. The optimization criterion is the amount of washed out contamination. The authors designed a matrix for the implementation of the full-factorial experiment plan. Samples in the form of a square tube with a size of 50 × 50 mm and a length of 50 mm were cleaned using a submersible washing machine in the form of a small-sized ultrasonic bath Specos V-100. A solution consisting of sodium carbonate and a mixture of surfactants in a ratio of 9:1 was used as a detergent. The modes of ultrasonic cleaning were changed in accordance with the variation of three factors: cleaning duration – from 5 to 15 minutes, washing solution temperature – from 40 to 80°C; concentration of the aqueous solution of detergent components – from 5 to 25 g/l. The reproducibility of the experimental results was confirmed using the Cochran test. The significance of the regression coefficients was determined using Student's t-test. The model was validated using the Fisher criterion. Based on the regression equation, the authors determined response surfaces, in which the dependences are extremely close to linear. It is concluded that with washing duration of 12 minutes, a washing solution temperature of 70°C, and a concentration of the aqueous solution of detergent components of 20 g/l, the amount of washed out contamination is maximum.

Keywords: ultrasonic cleaning, efficiency, intensification, criteria, optimization, cleaning, pollution, response surface

For citation: Petrik D.Yu., Korneev V.M., Petrik V.Yu. Intensifying the process of cleaning parts in submersible washing machines. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(5): 73-77. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>.

Введение. На сегодняшний день проведено множество исследований очистки деталей с использованием ультразвука. Очищению способствуют кавитационные пузыри, индуцированные высокочастотным давлением (звуковыми волнами), которые создают высокие силы действия на прилипающие к разным материалам загрязнители. Образование кавитационных пузырьков при очищении детали является сложным процессом, на который влияет большое количество факторов: температура моющего раствора, концентрация моющей жидкости, состав моющей жидкости, форма и материал детали, мощность ультразвукового излучателя, состав загрязнителя, время очищения детали [1]. Вариации и комбинации этих факторов влияют на количество образовавшихся кавитационных пузырьков, а также на эффективность очистки деталей.

Анализ использования ультразвука для очищения деталей [2-7] дает основания для поиска новых путей оптимизации этого процесса, а также возможность вывода новых математических моделей для более точного описания с учетом воздействия разных факторов.

Предварительные исследования зарубежных исследований показали, что на процесс мойки наибольшее влияние оказывают температура моющего раствора, концентрация моющего вещества и время очищения детали [8, 9]. Также рассматривалось влияние температуры моющего раствора и частоты ультразвукового излучения на количество смываемого загрязнения [10]. Однако на данный момент нет экспериментальных исследований, учитывающих влияние трех основных факторов (температуры моющего раствора, концентрации моющего вещества и продолжительности процесса) на очистку деталей в малогабаритных (5...10 л) ультразвуковых ваннах. Поэтому авторами исследовались именно эти факторы.

Цель исследований: интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах методом ультразвуковой очистки в зависимости от длительности мытья, температуры моющего раствора, концентрации водного раствора моющих компонентов.

Материалы и методы. В качестве объектов мойки использованы фрагменты трубы квадратного профиля размерами 50 × 50 мм, длиной 50 мм. Для создания имитации загрязнения сначала образец погружался в суспензию суглинистого грунта, взятого с поверхности пахотного слоя поля. Излишки загрязняющей смеси встряхивались двукратным обстукиванием по краю емкости. Затем образец сушился до влажности окружающей среды (помещение лаборатории с температурой воздуха около 22°C). Далее образец помещался в смесь, состоящую из 20% строительного битума и 80% отработанной моторной смазки. Температура смеси составляла 150°C. Затем образцы располагались на пористом картоне для охлаждения и впитывания избытка загрязняющей смеси. После охлаждения и выдержки на адсорбирующем материале в течение одних суток образцы взвешивались на весах модели PS510. R1 с точностью до 0,01 г.

В качестве моющего средства использовался раствор, состоящий из карбоната натрия Na_2CO_3 и смеси поверхностно-активных веществ (средства для мытья посуды) в пропорции 9:1. Очистка образцов осуществлялась с помощью погружной моечной машины в виде малогабаритной (5...10 л) ультразвуковой ванны Specos V-100. Режимы ультразвуковой очистки менялись в зависимости от длительности процесса, температуры моющего раствора и концентрации водного раствора моющих компонентов (табл. 1, 2).

Таблица 1

Факторы и уровни варьирования

Table 1

Factors and variation levels

Фактор <i>Factor</i>	Обозначение <i>Designation</i>	Уровень варьирования факторов / <i>Level of factor variation</i>			Интервал варьирования <i>Variation interval</i>
		-1	0	+1	
Продолжительность процесса мойки, <i>t</i> , мин <i>Washing process duration, t, min</i>	<i>x</i> 1	5	10	15	5
Температура раствора, <i>T</i> , °C <i>Solution temperature, T, °C</i>	<i>x</i> 2	40	60	80	20
Концентрация моющих веществ, <i>p</i> , г/л <i>Concentration of detergents, p, g/l</i>	<i>x</i> 3	5	15	25	10

Результаты и их обсуждение. Содержание компонентов моющего средства составило 9,5%. Исходя из этого, взяли 1,06 г карбоната натрия. Приготовленный моющий раствор использовали в процессе очистки 8 образцов, осуществляемой согласно плану эксперимента (табл. 2) в три серии в рандомизированном порядке [1, 7]. В первой серии

принимали участие образцы 7, 6, 2, 5, 4, 1, 8, 3; во второй серии – образцы 4, 1, 6, 8, 7, 3, 5, 2; в третьей – 8, 6, 2, 7, 1, 5, 3, 4.

Далее каждый образец был высушен и взвешен.

Таким образом, в каждом опыте был подсчитан процент смытого загрязнения (табл. 3, 4).

Таблица 2

План проведения опытов с кодированными значениями факторов

Table 2

Plan of conducting experiments with coded values of factors

№ опыта <i>Experiment number</i>	Фиктивная переменная* / <i>Dummy variable*</i>	<i>t</i> , мин	<i>T</i> , °C	<i>p</i> , г/л
	<i>x0</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>
1	+	+	–	–
2	+	–	–	–
3	+	+	+	–
4	+	–	+	–
5	+	+	–	+
6	+	–	–	+
7	+	+	+	+
8	+	–	+	+

* Фиктивная переменная *x0* вводится для удобства проведения расчетов / *Dummy (fictitious) variable x0 is introduced to assist in calculations.*

Таблица 3

Реализация плана ПФЭ 2³

Table 3

Implementation of MFE2³ plan

№ опыта <i>j</i> <i>Experiment number j</i>	Матрица плана <i>Plan matrix</i>				Процент смытого загрязнения в опытах <i>Amount of washed out contamination in experiments</i>			Среднее значение <i>Mean</i>
	<i>x0</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>y1</i>	<i>y2</i>	<i>y3</i>	<i>yj</i>
1	+	+	–	–	28,5	31,3	41,2	33,7
2	+	–	–	–	17,6	12,5	16,4	15,5
3	+	+	+	–	51,1	43,5	64,5	53,0
4	+	–	+	–	22,5	24,7	33,5	27,0
5	+	+	–	+	25,5	21,6	32,6	26,5
6	+	–	–	+	20,4	14,6	17,9	17,6
7	+	+	+	+	66,7	73,9	80,2	73,6
8	+	–	+	+	48,4	50,1	61,2	53,2

Таблица 4

Расширенная матрица плана ПФЭ 2³

Table 4

Extended matrix of MFE2³ plan

№ опыта <i>Experiment number</i>	Матрица плана / <i>Plan matrix</i>			<i>x0</i>	<i>x1 x2</i>	<i>x1 x3</i>	<i>x2 x3</i>	<i>x1 x2 x3</i>	<i>yj</i>
	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>						
1	+	–	–	+	–	–	+	+	33,7
2	–	–	–	+	+	+	+	–	15,5
3	+	+	–	+	+	–	–	–	53,0
4	–	+	–	+	–	+	–	+	27,0
5	+	–	+	+	–	+	–	–	26,5
6	–	–	+	+	+	–	–	+	17,6
7	+	+	+	+	+	+	+	+	73,6
8	–	+	+	+	–	–	+	–	53,2

Каждый опыт повторяли одинаковое количество раз. Воспроизводимость результатов проверена с помощью критерия Кохрена.

Результаты воспроизводятся, если критерий Кохрена при 5-процентном уровне значимости [4]:

$$G_p = \frac{S_u \text{Max}}{\sum_{u=1}^n S_u^2} \leq G_m(0,05; n; f_u).$$

Табличное значение критерия Кохрена при числе независимых оценок дисперсии $n = 8$ и числе степеней свободы каждой оценки $f_u = 2$ будет составлять 0,516.

Расчетное значение –

$$G_p = \frac{113,1}{330,8} = 0,341.$$

Расчетное значение критерия Кохрена меньше табличного, из чего следует вывод о воспроизводимости процесса.

Математическая модель для плана 1-го порядка представляет собой неполное квадратное уравнение:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (1)$$

При помощи метода наименьших квадратов выведены формулы для нахождения коэффициентов уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{0j} y_j = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N y_j; b_i = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ij} y_j;$$

$$b_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ij} x_{kj} y_j; b_{isk} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ij} x_{sj} x_{kj} y_j.$$

После обработки экспериментальных данных (табл. 3, 4) получено уравнение регрессии в общем виде:

$$y = 37,5 + 9,18x_1 + 14,19x_2 + 5,21x_3 + 2,41x_1x_2 - 1,86x_1x_3 + 6,49x_2x_3 + 0,46x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Проведена оценка значимости коэффициентов регрессии с помощью критерия Стьюдента:

$$|b_a| \geq \Delta b_a = t(0,05; f_i) \frac{S_y}{\sqrt{n}}.$$

Табличное значение критерия Стьюдента при 5-процентном уровне значимости и числе степеней свободы дисперсий воспроизводимости равно 2,12. Следовательно, значение доверительного интервала Δb_a при средней дисперсии $S_y = 2,53$:

$$\Delta b_a = 2,12 \frac{2,53}{\sqrt{8}} = 4,82.$$

На основе критерия Δb_a можно утверждать, что для данного уравнения регрессии значимыми являются следующие коэффициенты: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{23}$. Тогда уравнение регрессии приобретает вид:

$$y = 37,5 + 9,18x_1 + 14,19x_2 + 5,21x_3 + 6,49x_2x_3. \quad (3)$$

Дисперсия адекватности полученной модели определяется при помощи критерия Фишера. Модель адекватна, если критерий Фишера при 5-процентном уровне значимости:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_T(0,05; f_{ad}; f_u).$$

Табличное значение критерия Фишера при числе степеней свободы дисперсии адекватности $f_{ad} = 3$ и числе степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_y = 16$ будет составлять 3,23:

$$\frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{20,66}{41,35} = 0,49.$$

Расчетное значение критерия Фишера меньше табличного. Соответственно полученная модель адекватна эксперименту и может быть использована для описания процесса. Это дает возможность перейти от кодированных значений x_1, x_2, x_3 к их натуральным значениям:

$$y = -2,04 + 1,83x_1 + 0,22x_2 - 1,42x_3 + 0,03x_2x_3. \quad (4)$$

На основе уравнения (3) были построены поверхности отклика. При этом учитывалось изменение только двух факторов, а третий был равен нулю (рис. 1).

Выведенные зависимости весьма близки к линейным. При увеличении всех параметров увеличивается процент смытого загрязнения.

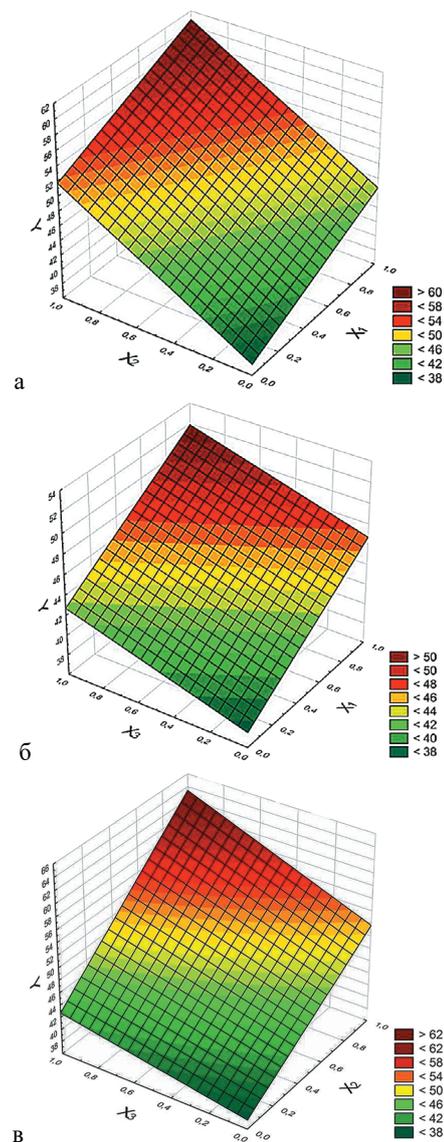


Рис. 1. Поверхности отклика процента смытого загрязнения в зависимости от продолжительности процесса и температуры раствора (а), продолжительности процесса и концентрации моющих веществ (б), температуры раствора и концентрации моющих веществ (в)

Fig. 1. Response surfaces of the percentage of washed off pollution depending on the process duration and the solution temperature (a), the process duration and the concentration of detergents (b), the solution temperature and the concentration of detergents (c)

Уравнение регрессии в раскодированном виде позволяет определить процент смытого загрязнения при подстановке значенной длительности процесса мытья, температуры раствора и концентрации моющих веществ, лежащих в области эксперимента: $5 \text{ мин} \leq t \leq 15 \text{ мин}$, $40^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C}$, $5 \text{ г/л} \leq p \leq 25 \text{ г/л}$. При этом было определено, что наиболее рациональным процесс очистки будет при оптимальных значениях времени очистки 12 мин при температуре 70°C и концентрации раствора 20 г/л.

Список использованных источников

1. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства // *Наукоедение: Интернет-журнал*. 2013. № 3 (16). С. 69. EDN: QZXYOR.
2. Майоров А.В., Михеева Д.А. Сравнительный анализ режимов мойки жестяных банок в моечных машинах струйного и погружного типов // *Вестник Марийского государственного университета*. 2014. № 1 (13). С. 48-53. EDN: SGLMVL.
3. Майоров А.В. Влияние факторов очистки на качество промывки консервных банок в моечной машине погружного типа // *Инновации и инвестиции*. 2018. № 5. С. 250-253. EDN: XBQFAT.
4. Майоров А.В., Яйцева Н.Э. Анализ воздействия струй на очищаемый объект // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2018. № 5-1. С. 217-219. EDN: USIXBY.
5. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application. 1995. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950025362> (дата обращения: 09.06.2022).
6. Hicks Charles R., Kenneth Turner V. Fundamental Concepts on design of Experiments. Oxford University Press. 1999. 576 p.
7. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016; 29: 519-523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>
8. Verhaagen B., Rivas D.F. Measuring cavitation and its cleaning effect. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016; 29: 619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>
9. Vetrinurugan, Mike Goodson, Terry Lim, Samiheta, Nagarajan J. Siddharth. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013; 4 (4): 174-177. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.288>
10. Weller R.N., Brady J.M., Bernier W.E. Efficacy of ultrasonic cleaning. *Journal of Endodontics*. 1980; 6 (9): 740-743. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(80\)80185-3](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(80)80185-3)

Критерии авторства

Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.04.2022

Одобрена после рецензирования 05.08.2022

Принята к публикации 05.09.2022

Выводы

1. На процесс очистки детали в ультразвуковой ванне наибольшее влияние оказывают температура раствора и продолжительность процесса мытья.

2. Анализ поверхностей отклика дает основания для проведения будущих исследований в целях установления оптимальных значений концентрации моющих веществ.

References

1. Ilyukhin A.V., Kolbasin A.M., Tsepkin P.A. Metody ul'trazvukovoy oshistki detaley v usloviyakh osnovnogo i remontnogo proizvodstva [Methods of ultrasonic cleaning of parts in the conditions of the main and repair production]. *Naukovedenie: Internet-journal*. 2013; 3 (16): 69. (In Rus.)
2. Maiorov A.V., Mikheeva D.A. Sravnitel'niy analiz rezhimov moyki zhestyanykh banok v moyechnykh mashinakh struynogo i pogruzhnogo tipov [Comparative analysis of washing modes for tin cans in jet and immersion washing machines]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 1 (13): 48-53. (In Rus.)
3. Mayorov A.V. Vliyaniye faktorov oshistki na kachestvo promyvki konservnykh banok v moyechnoy mashine pogruzhnogo tipa [Influence of cleaning factors on the quality of washing cans in a submersible washing machine]. *Innovatsii i investitsii*. 2018; 5: 250-253. (In Rus.)
4. Mayorov A.V., Yaitseva N.E. Analiz vozdeystviya struy na oshishchayemyy ob'ekt [Analysis of the impact of jets on the cleaned object]. *Mezhdunarodniy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2018; 5-1: 217-219. (In Rus.)
5. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application. 1995. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950025362> (Access date: 09.06.2022).
6. Hicks Charles R., Kenneth Turner V. Fundamental Concepts on design of Experiments. Oxford University Press. 1999. 576 p.
7. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016; 29: 519-523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>
8. Verhaagen B., Rivas D.F. Measuring cavitation and its cleaning effect. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016; 29: 619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>
9. Vetrinurugan, Mike Goodson, Terry Lim, Samiheta, Nagarajan J. Siddharth. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013; 4 (4): 174-177. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.288>
10. Weller R.N., Brady J.M., Bernier W.E. Efficacy of ultrasonic cleaning. *Journal of Endodontics*. 1980; 6 (9): 740-743. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(80\)80185-3](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(80)80185-3)

Contribution

D.Yu. Petrik, V.M. Korneev and V.Yu. Petrik performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. D.Yu. Petrik, V.M. Korneev and V.Yu. Petrik have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 14.04.2022

Approved after reviewing 05.08.2022

Accepted for publication 05.09.2022