




## Оптимизация процесса смешения жидкофазных гетерогенных продуктов на основе многофакторного статистического анализа

Александр Б. Емельянов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:okipr-mip@mail.ru">okipr-mip@mail.ru</a>	 0000-0002-8428-4279
Максим В. Копылов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kopylov-maks@yandex.ru">kopylov-maks@yandex.ru</a>	 0000-0003-2678-2613
Дмитрий А. Казарцев	<sup>2</sup>	<a href="mailto:kda_79@mail.ru">kda_79@mail.ru</a>	 0000-0001-6597-2327
Михаил К. Абрамян	<sup>1</sup>	<a href="mailto:abramyan-mikhail@mail.ru">abramyan-mikhail@mail.ru</a>	
Максим В. Нечаев	<sup>3</sup>	<a href="mailto:m.v.n.@mail.ru">m.v.n.@mail.ru</a>	

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия




<sup>2</sup> Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной вал, 73, Москва, 109004, Россия

<sup>3</sup> «Старт», пр-т Труда, 91, оф. 211, г. Воронеж, 394026, Россия,

**Аннотация.** Основной задачей экспериментального исследования всех процессов является анализ, изучение и обобщение всех имеющихся результатов. В соответствии с идеей шагового поиска эксперимент проводился в несколько этапов. Число этапов и действия на каждом из них зависели от результатов предыдущего этапа и конечной цели исследований. Конечной целью исследования является определение оптимальных условий протекания процесса перемешивания жидких агрегатов получения однородной структуры. Исследования процесса перемешивания были проведены на экспериментальной установке, созданной на кафедре. Для обработки экспериментальных исследований был применен программный комплекс STATISTICA 12. Для получения уравнения регрессии матричные данные были обработаны при помощи программного комплекса Microsoft Excel 2010. Для оптимизации процесса, величины выходных параметров преобразованы в безразмерную шкалу желательности  $d$ . Установлено, что функция желательности  $D$ , характеризующая адекватность полученных значений, имеет экстремум в опыте 12 и составляет 0,733666. Основываясь на полученных данных оптимальными следует считать следующие параметры при перемешивании жидких агрегатов: окружная скорость вала мешалки в пределах 4 м/с, при этом время перемешивания составляет 8 с, а концентрация хладагента 20%.

**Ключевые слова:** моделирование, функция желательности, перемешивание, жидкие агрегаты, хладагент

## Optimization of the process of mixing liquid-phase heterogeneous products by mathematical modeling

Alexander B. Emelyanov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:okipr-mip@mail.ru">okipr-mip@mail.ru</a>	 0000-0002-8428-4279
Maxim V. Kopylov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kopylov-maks@yandex.ru">kopylov-maks@yandex.ru</a>	 0000-0003-2678-2613
Dmitry A. Kazartsev	<sup>2</sup>	<a href="mailto:kda_79@mail.ru">kda_79@mail.ru</a>	 0000-0001-6597-2327
Mikhail K. Abrahamyan	<sup>1</sup>	<a href="mailto:abramyan-mikhail@mail.ru">abramyan-mikhail@mail.ru</a>	
Maxim V. Nechaev	<sup>3</sup>	<a href="mailto:m.v.n.@mail.ru">m.v.n.@mail.ru</a>	

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Technologies and Management, 73 Zemlyanoy Val street, Moscow, 109004, Russia

<sup>3</sup> Start, Prospect of Labor, Voronezh, 394026, Russia

**Abstract.** The main objective of the experimental study of all processes is the analysis, study and generalization of all available results. In accordance with the idea of a step search, the experiment was carried out in several stages. The number of stages and actions at each of them depended on the results of the previous stage and the ultimate goal of research. The ultimate goal of the study is to determine the optimal conditions for the process of mixing the liquid aggregates to obtain a homogeneous structure. Studies of the mixing process were carried out on an experimental setup created at the department. To process experimental studies, the STATISTICA 12 software package was used. To obtain the regression equation, the matrix data were processed using the Microsoft Excel 2010 software package. To optimize the process, the output parameters were converted to a dimensionless scale of desirability  $d$ . It was established that the desirability function  $D$ , which characterizes the adequacy of the obtained values, has an extremum in experiment 12 and is 0.733666. Based on the obtained data, the following parameters should be considered optimal when mixing liquid aggregates: the peripheral speed of the mixer shaft is within 4 m/s, while the mixing time is 8 s and the refrigerant concentration is 20%.

**Keywords:** modeling, desirability function, mixing, liquid aggregates, refrigerant

### Введение

Основной задачей экспериментального исследования всех процессов является анализ, изучение и обобщение всех имеющихся результатов. Полученные данные могут охватывать либо малый диапазон значений, или обширный,

на которых строятся первые этапы моделирования. В ходе выполнения поставленной задачи, предварительно составляется весь список имеющихся факторов, из которых необходимо исключить малозначимые факторы, но при этом нельзя пропускать особо значимые

#### Для цитирования

Емельянов А.Б., Копылов М.В., Казарцев Д.А., Абрамян М.К., Нечаев М.В. Оптимизация процесса смешения жидкофазных гетерогенных продуктов на основе многофакторного статистического анализа // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 47–52. doi:10.20914/2310-1202-2020-1-47-52

#### For citation

Emelyanov A.B., Kopylov M.V., Kazartsev D.A., Abrahamyan M.K., Nechaev M.V. Optimization of the process of mixing liquid-phase heterogeneous products by mathematical modeling. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 47–52. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-1-47-52

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

факторы. На основе вышесказанного завершается предварительная подготовка к экспериментальной части.

### Материалы и методы

В соответствии с идеей шагового поиска эксперимент проводился в несколько этапов. Число этапов и действия на каждом из них зависели от результатов предыдущего этапа и конечной цели исследований. Конечной целью исследования является определение оптимальных условий протекания процесса (рисунок 1).

В качестве основных факторов были выбраны:  $X_1$  – окружная скорость вала мешалки, м/с (1–7);  $X_2$  – время смешения, с (2–8);  $X_3$  – концентрация хладагента, % (5–35). Выбранные факторы совместимы и не коррелируемы между собой.

В таблице 1 представлены данные для определения условий опыта. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 2. Общее число опытов  $N = 18$ , число опытов в центре плана  $N_0 = 6$ , число факторов  $k = 3$ , плечо «звездной» точки  $r = 1,682$ .

В качестве функции отклика выбрано  $Y_1$  – размер жидких агрегатов, мм (1–6).

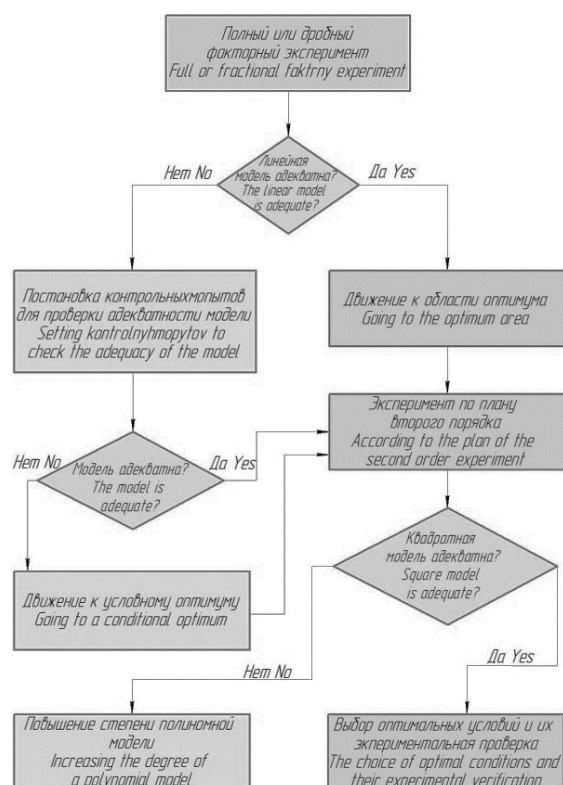


Рисунок 1. Структурная схема экспериментальных исследований с целью оптимизации процесса перемешивания

Figure 1. Block diagram of experimental studies to optimize the mixing process

Таблица 1. Данные для определения условий опыта

Table 1.

Data for determining the conditions of the experiment

Условия планирования Planning Conditions	Пределы изменения факторов Limits of change of factors		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Нулевой уровень (0) Zero Level (0)	4	5	20
Интервал варьирования Range of variation	2,658	3,568	17,836
Верхний уровень (+1) Upper Level (+1)	4,784	6,784	28,918
Нижний уровень (-1) Lower level (-1)	2,216	3,216	11,082
Верхняя «звездная» точка (+1,682) Top “star” point (+1.682)	7	8	35
Нижняя «звездная» точка (-1,682) Lower “star” point (-1.682)	1	2	5

Экспериментальные исследования проводились на установке, представленной на рисунке 2.



Рисунок 2. Установка для проведения экспериментальных исследований

Figure 2. Installation for experimental research

Для обработки экспериментальных исследований был применен программный комплекс STATISTICA 12.

Для получения уравнения регрессии матричные данные были обработаны при помощи программного комплекса Microsoft Excel 2010.

Уравнение регрессии в физических переменных имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{Var}_1 = & -0,322866 - 0,820732 X_1 + 0,949876 X_2 \\ & + 0,425811 X_3 + 0,0891186 X_1^2 - 0,0237339 X_1 \\ & X_2 + 0,00824515 X_1 X_3 - 0,11633 X_2^2 + 0,0157137 X_2 \\ & X_3 - 0,00754096 X_3^2 \end{aligned}$$

Таблица 2.

Матрица планирования и результаты экспериментальных исследований процесса перемешивания

Table 2.

Planning matrix and the results of experimental studies of the mixing process

№	Область факторного пространства The domain of the quotient space						Выходные параметры Output parameters	
	Кодированные Coded			Физические Physical			Экспериментальные Experimental	Расчётные Calculated
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Размер жидких агрегатов, мм Size of liquid aggregates, mm	Размер жидких агрегатов, мм Size of liquid aggregates, mm
1	-1	-1	-1	2,216	3,216	11,082	3	3,414
2	-1	-1	1	2,216	3,216	28,918	4,2	5,053
3	-1	1	-1	2,216	6,784	11,082	1,3	1,843
4	-1	1	1	2,216	6,784	28,918	2,1	2,482
5	1	-1	-1	4,784	3,216	11,082	2,5	2,947
6	1	-1	1	4,784	3,216	28,918	4,5	4,964
7	1	1	-1	4,784	6,784	11,082	1,4	1,159
8	1	1	1	4,784	6,784	28,918	1,8	2,176
9	-1,682	0	0	1	5	20	5,7	4,761
10	1,682	0	0	7	5	20	4,3	4,392
11	0	-1,682	0	4	2	20	5,5	4,596
12	0	1,682	0	4	8	20	1,1	0,860
13	0	0	-1,682	4	5	5	1,2	0,899
14	0	0	1,682	4	5	35	4,1	3,257
15	0	0	0	4	5	20	3,8	3,775
16	0	0	0	4	5	20	3,8	3,775
17	0	0	0	4	5	20	3,8	3,775
18	0	0	0	4	5	20	3,8	3,775

$$L, \text{ мм} = 7,6853 + 0,0188 \cdot x - 1,3999 \cdot y - 0,0784 \cdot x^2 + 0,0247 \cdot x \cdot y + 0,1521 \cdot y^2$$

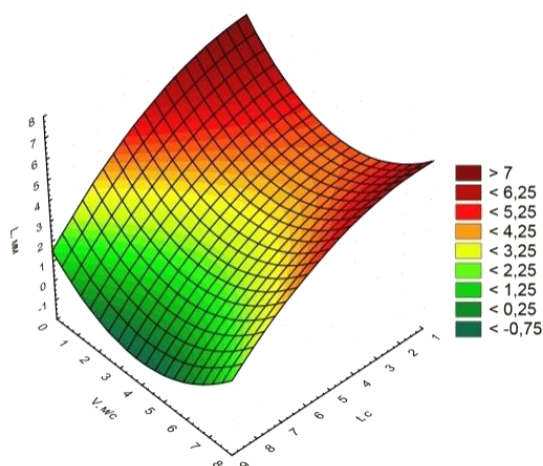


Рисунок 3. Зависимость размера жидких агрегатов от окружной скорости вала мешалки и времени перемешивания

Figure 3. The dependence of the size of liquid aggregates on the peripheral speed of the shaft of the mixer and the mixing time

$$L, \text{ мм} = 3,4811 - 1,5388 \cdot x + 0,2342 \cdot y + 0,1354 \cdot x^2 + 0,0191 \cdot x \cdot y - 0,0059 \cdot y^2$$

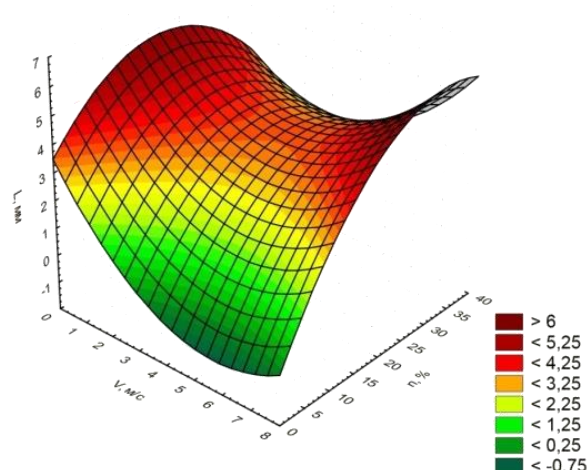


Рисунок 4. Зависимость размера жидких агрегатов от окружной скорости вала мешалки и концентрации хладагента

Figure 4. The dependence of the size of liquid aggregates on the peripheral speed of the mixer shaft and the concentration of refrigerant

$L, \text{ мм} = -1,6885 + 0,4358 \cdot x + 0,9692 \cdot y - 0,0081 \cdot x^2 - 0,0086 \cdot x \cdot y - 0,1472 \cdot y^2$

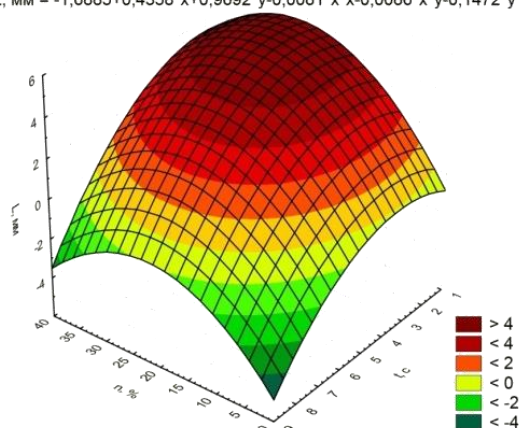


Рисунок 5. Зависимость размера жидких агрегатов от времени перемешивания и концентрации хладагента

Figure 5. The dependence of the size of liquid aggregates on the mixing time and the concentration of refrigerant

### Результаты и обсуждение

Из рисунков 3–5 видно, что для того чтобы обеспечить требуемый размер жидких агрегатов необходимо установить окружную скорость вала мешалки в пределах 3–5 м/с, при этом время смешения составляет 7–8 с, а концентрация хладагента 17–23%.

Учитывая, что все исследуемые факторы однозначно влияют на величину жидких агрегатов, было проведено исследование по определению оптимальных условий процесса (методом Харрингтона) [8–10].

Для оптимизации процесса величины выходных параметров преобразованы в безразмерную шкалу желательности  $d$  ( $d_1$  – выход готового продукта).

Для оценки полученных расчетных данных воспользуемся количественным, универсальным показателем качества – обобщенной функцией желательности  $D$ . По максимальному значению, которого можно определить оптимальные параметры процесса.

Согласно формуле:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ik} x_i x_k + \sum b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

где  $b_0$  – свободный член уравнения, который представляет среднюю величину отклика при условии, что исследуемые факторы располагаются на средних, «нулевых» уровнях;  $i, k$  – индексы факторов;  $b_i$  – коэффициенты при линейных членах;  $b_{ik}$  – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, которые показывают изменение степени влияния одного фактора на величину изменения другого;  $b_{ii}$  – коэффициенты квадратичных эффектов, которые показывают нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов.

Система уравнений для определения  $b_0$  и  $b_1$  для величины жидких агрегатов примет вид:

$$\begin{aligned} 1,51 &= b_0 + 0,86b_1; \\ -0,46 &= b_0 + 5,053b_1, \end{aligned}$$

где 0,86 – лучшее значение для  $Y_1$  (%); 5,053 – худшее значение для  $Y_1$  (%).

Отсюда  $b_0 = -0,47$  и  $b_1 = 1,91$ .

В рассматриваемом случае данное уравнение можно ограничить выходными параметрами следующего вида  $Y \leq Y_{\max}$  или  $Y \geq Y_{\min}$ . Предпочтительной формой преобразования  $Y$  в  $d$  служит экспоненциальная зависимость:

$$d = \exp[-\exp(-Y')], \quad (2)$$

где  $Y' = b_0 + b_1 Y$ .

Частные функции имеют следующий вид:

$$d_1 = \exp[-\exp(0,47 - 1,91Y_1)]. \quad (3)$$

Значения частных функций желательности для всех точек плана, определенные по этим формулам, приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Значения частных функций и обобщенной функции желательности каждого опыта

Table 3.

Values of particular functions and the generalized desirability function of each experience

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$D$
1	-1	-1	-1	0,997645
2	-1	-1	1	0,999897
3	-1	1	-1	0,953769
4	-1	1	1	0,986137
5	1	-1	-1	0,994264
6	1	-1	1	0,999878
7	1	1	-1	0,839490
8	1	1	1	0,975228
9	-1,682	0	0	0,999820
10	1,682	0	0	0,999636
11	0	-1,682	0	0,999753
12	0	1,682	0	0,733666
13	0	0	-1,682	0,750317
14	0	0	1,682	0,996823
15	0	0	0	0,998818
16	0	0	0	0,998818
17	0	0	0	0,998818
18	0	0	0	0,998818

Наглядное представление значений обобщенной функции желательности представлено на рисунке 6.



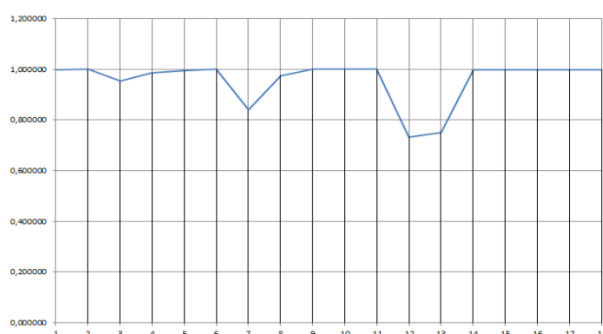


Рисунок 6. Обобщенная функция желательности (D)

Figure 6. Generalized desirability function (D)

## Заключение

В ходе проведенных исследований можно сделать вывод, что функция желательности  $D$ , характеризующая адекватность полученных значений имеет экстремум в опыте 12 и равно 0,733666. В основании данного результата оптимальными следует считать параметры: окружная скорость вала мешалки в пределах 4 м/с, при этом время перемешивания составляет 8 с, а концентрация хладагента 20%.

## Литература


- 1 Копылов М.В., Татаренков Е.А., Ткачев О.А., Горбатова А.В. Оптимизация процесса отжима растительного масла методом математического моделирования // Вестник ВГУИТ. 2017. № 1. С. 28–33.
- 2 Остриков А.Н., Слюсарев М.И., Горбатова А.В., Шендрик Т.А. Диффузионная модель перемешивания сливочно-растительных спредов // Вестник ВГУИТ. 2015. № 3. С. 7–12.
- 3 Rodrigues J. et al. Modeling and optimization of laboratory-scale conditioning of *Jatropha curcas* L. seeds for oil expression // Industrial Crops and Products. 2016. V. 83. P. 614–619.
- 4 Mateyev Y.Z., Shalginbaev D.B., Mateyeva S.Z., Kopylov M.V. et al. Mathematical modeling of the extracting process of vegetable oil on auger equipment // EurAsian Journal of BioSciences 13. 2019. P. 1875–1880.
- 5 Фролова Л.Н., Василенко В.Н., Копылов М.В., Дерканосова А.А. и др. Оптимизация параметров процесса получения биотоплива методами математического моделирования // Вестник международной академии холода. 2015. № 3. С. 63–67.
- 6 Янчуковская, Е.В. Математическое моделирование химического реактора идеального перемешивания // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2014. № 6 (11). С. 74–80.
- 7 Петров В.Н., Фафурин В.А., Мухаметшина Г.Ф., Малышев С.Л. Математическое моделирование процесса циркуляционного перемешивания двухкомпонентной жидкой фазы // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 123–126.
- 8 Shahi S., Ghasemi N., Rahimi S., Yavari H. et al. The Effect of Different Mixing Methods on Working Time, Setting Time, Dimensional Changes and Film Thickness of Mineral Trioxide Aggregate and Calcium-Enriched Mixture // Iranian endodontic journal. 2015. V. 10. № 4. P. 248.
- 9 Basturk F.B., Nekoofar M.H., Günday M., Dummer P. M. The effect of various mixing and placement techniques on the compressive strength of mineral trioxide aggregate // Journal of endodontics. 2013. V. 39. № 1. P. 111–114.
- 10 Sarli G.O., Filgueira R.R., Giménez D. Measurement of soil aggregate density by volume displacement in two non-mixing liquids // Soil Science Society of America Journal. 2001. V. 65. № 5. P. 1400–1403.

## References


- 1 Kopylov M.V., Tatarenkov E.A., Tkachev O.A., Gorbatova A.V. Optimization of the process of extraction of vegetable oil by the method of mathematical modeling. Proceedings of VSUET. 2017. no. 1. pp. 28–33. (in Russian).
- 2 Ostrikov A.N., Slyusarev M.I., Gorbatova A.V., Shendrik T.A. Diffusion model of mixing creamy-vegetable spreads. Proceeding of VSUET. 2015. no. 3. pp. 7–12. (in Russian).
- 3 Rodrigues J. et al. Modeling and optimization of laboratory-scale conditioning of *Jatropha curcas* L. seeds for oil expression. Industrial Crops and Products. 2016. vol. 83. pp. 614–619.
- 4 Mateyev Y.Z., Shalginbaev D.B., Mateyeva S.Z., Kopylov M.V. et al. Mathematical modeling of the extracting process of vegetable oil on auger equipment. EurAsian Journal of BioSciences 13. 2019. pp. 1875–1880.
- 5 Frolova L.N., Vasilenko V.N., Kopylov M.V., Derkanosova A.A. et al. Optimization of parameters of the process of obtaining biofuels by methods of mathematical modeling. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2015. no. 3. pp. 63–67. (in Russian).
- 6 Yanchukovskaya E.V. Mathematical modeling of a chemical reactor of ideal mixing. University proceedings. Applied Chemistry and Biotechnology. 2014. no. 6 (11). pp. 74–80. (in Russian).
- 7 Petrov V.N., Fafurin V.A., Mukhametshina G.F., Malyshev S.L. Mathematical modeling of the process of circulating mixing of a two-component liquid phase. Bulletin of the Technological University. 2017. vol. 20. no. 15. pp. 123–126. (in Russian).
- 8 Shahi S., Ghasemi N., Rahimi S., Yavari H. et al. The Effect of Different Mixing Methods on Working Time, Setting Time, Dimensional Changes and Film Thickness of Mineral Trioxide Aggregate and Calcium-Enriched Mixture. Iranian endodontic journal. 2015. vol. 10. no. 4. pp. 248.
- 9 Basturk F.B., Nekoofar M.H., Günday M., Dummer P.M. The effect of various mixing and placement techniques on the compressive strength of mineral trioxide aggregate. Journal of endodontics. 2013. vol. 39. no. 1. pp. 111–114.
- 10 Sarli G.O., Filgueira R.R., Giménez D. Measurement of soil aggregate density by volume displacement in two non-mixing liquids. Soil Science Society of America Journal. 2001. vol. 65. no. 5. pp. 1400–1403.

# Сведения об авторах


**Александр Б. Емельянов** к.т.н., доцент, кафедра технологии органических соединений, переработки полимеров и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, okipr-mip@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8428-4279>

**Максим В. Копылов** к.т.н., доцент, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kopylov-maks@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

**Дмитрий А. Казарцев** к.т.н., доцент, кафедра технологии броидильных производств и виноделия им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ), ул. Земляной вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, kda\_79@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6597-2327>

**Михаил К. Абрамян** магистр, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, abramyan-mikhail@mail.ru

**Максим В. Нечаев** доцент, директор, Старт, пр-т Труда, 91, оф. 211, г. Воронеж, 394026, m.v.n.@mail.ru

## Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

## Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Information about authors


**Alexander B. Emelyanov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, compound technologies, polymer processing and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, okipr-mip@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8428-4279>

**Maxim V. Kopylov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, fat technology, processes and devices of chemical and food industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kopylov-maks@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

**Dmitry A. Kazartsev** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technology of fermentation and winemaking named after G.G. Agabalian, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, Zemlyanoy Val street 73, Moscow, 109004, Russia, kda\_79@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6597-2327>

**Mikhail K. Abrahamyan** master student, compound technologies, polymer processing and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, abramyan-mikhail@mail.ru

**Maxim V. Nechaev** associate professor, director, Start, Prospect Truda, 91, of. 211, Voronezh, Russia, m.v.n.@mail.ru

## Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

<b>Поступила</b> 06/02/2020	<b>После редакции</b> 17/02/2020	<b>Принята в печать</b> 25/02/2020
<b>Received</b> 06/02/2020	<b>Accepted in revised</b> 17/02/2020	<b>Accepted</b> 25/02/2020