

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА НЕОДНОРОДНОСТИ СУХОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЛОПАСТНОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СТЕРЖНЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Кикин Н.О.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: коэффициент неоднородности, лопастной смеситель, стержневые элементы, процесс смешивания, сухая смесь, лопасть.

Аннотация. Смешивание – один из наиболее распространенных процессов в производстве строительных материалов. В мире существует большое разнообразие смесительных машин. Двухвальные лопастные смесители относятся к смесителям принудительного действия и используются в промышленности для получения различных смесей. Рассмотрены их основные достоинства и недостатки. Описана целесообразность установки стержневых элементов цилиндрической формы перед лопастями, которые позволяют интенсифицировать процесс смешивания, повышая однородность приготавливаемых смесей. С использованием экспериментальной модели лопастного смесителя и метода математического планирования экспериментов проведены исследования процесса подготовки сухой цементно-песчаной смеси в двухвальном смесителе с установленными стержневыми элементами цилиндрической формы. Получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость коэффициента ее неоднородности от частоты вращения лопастных валов, угла установки лопастей относительно плоскости их вращения и расстояния между рабочими поверхностями лопастей и стержневыми элементами. Определены экстремумы функции. Установлены основные закономерности изменения коэффициента неоднородности от варьируемых факторов.

DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF HETEROGENEITY OF A DRY BUILDING MIXTURE IN A HORIZONTAL PADDLE MIXER WITH ROD ELEMENTS

Kikin N.O.

Belgorod Shukhov State Technological University, Belgorod

Keywords: coefficient of heterogeneity, paddle mixer, core elements, mixing process, dry mix, blade.

Abstract. Mixing is one of the most common processes in the production of building materials. There is a wide variety of mixing machines in the world. Twin-shaft paddle mixers are forced-action mixers and are used in industry to obtain various mixtures. Their main advantages and disadvantages are considered. The expediency of installing cylindrical rod elements in front of the blades is described, which make it possible to intensify the mixing process, increasing the uniformity of the prepared mixtures. Using an experimental model of a paddle mixer and the method of mathematical planning of experiments, the process of preparing a dry cement-sand mixture in a two-shaft mixer with installed cylindrical rod elements was studied. A regression equation has been obtained that adequately describes the dependence of its inhomogeneity coefficient on the rotational speed of the bladed shafts, the angle of installation of the blades relative to the plane of their rotation, and the distance between the working surfaces of the blades and the rod elements. The extrema of the function are determined. The main patterns of change in the coefficient of heterogeneity from variable factors are established.

Введение. Для производства сухих строительных смесей используется большое разнообразие смесительных машин. Двухвальные лопастные смесители принудительного действия обладают целым рядом преимуществ, среди которых достаточно большая производительность, универсальность применения, простота обслуживания и ремонта. Из недостатков следует выделить невысокую интенсификацию смешивания, что приводит к ухудшению качества готового продукта [1-6].

Для увеличения конкурентоспособности смесительного оборудования на рынке производства строительных материалов, а также с целью повышения интенсификации процесса смешивания в двухвальном лопастном смесителе, применены стержневые элементы цилиндрической формы. Стержневые элементы располагаются перед рабочей поверхностью лопасти. При движении лопасти в сыпучей среде перед её рабочей поверхностью образуются

уплотнение, в котором массообменные процессы происходят значительно медленней, чем на границе его образования [7,8]. Установленные стержневые элементы предназначены для деформации этого уплотнения, изменяя при этом направление движения потока материала, тем самым интенсифицируя процесс смешивания [9].

Для оценки качества смеси, а именно ее однородности, применяются различные методы, которые подробно описаны в работе [10]. Наиболее распространен метод определения коэффициента неоднородности V_c по известной формуле [10, 11]:

$$V_c = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^x (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}}{\bar{x}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где \bar{x} – среднее содержание ключевого компонента в смеси, %; x_i – содержание ключевого компонента в каждой из проб, %; n – число проанализированных проб.

Материалы и методы исследования. Исследования по определению коэффициента неоднородности проводились на экспериментальной установке двухвального смесителя с расположенными перед рабочей поверхностью лопасти стержневыми элементами цилиндрической формы (рис. 1).

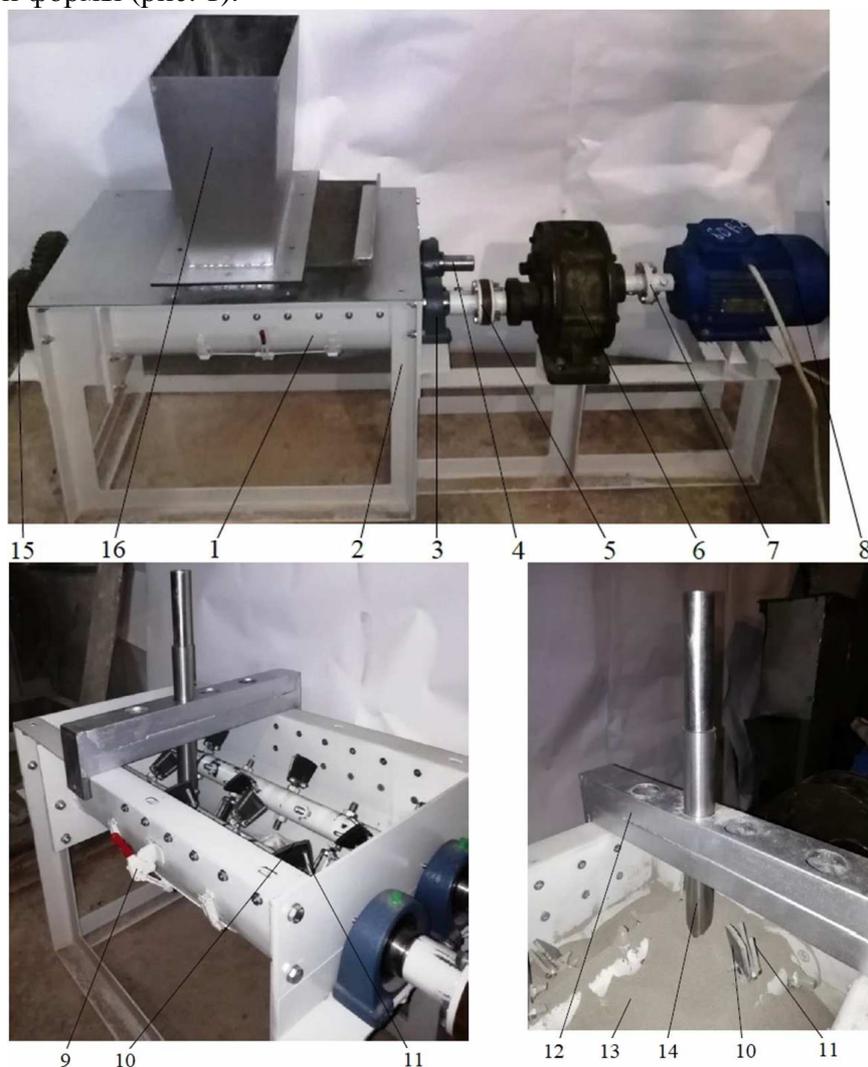


Рис. 1. Экспериментальная установка двухвального смесителя со стержневыми элементами:

- 1 – корпус, 2 – рама, 3 – подшипник, 4 – вал, 5 – муфта, 6 – редуктор, 7 – муфта, 8 – электродвигатель,
- 9 – разгрузочное устройство, 10 – лопасть, 11 – стержневые элементы цилиндрической формы,
- 12 – кондуктор для отбора проб, 13 – смешиваемый материал, 14 – пробоотборник, 15 – шестерни,
- 16 – бункер загрузки материалов

Объем рабочей камеры смесителя составляет $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, её длина – 0,5 м. Мощность установленного электродвигателя $P_{ном}=2,2 \text{ кВт}$. Частота вращения лопастных валов регулировалась в пределах от $0,66 \dots 1,34 \text{ с}^{-1}$ при помощи частотного регулятора Delta VFD-E [12].

В экспериментальной установке осуществлялась подготовка сухой цементно-песчаной смеси согласно СП82-101-98. В качестве сырьевых компонентов использовался портландцемент ЦЕМ I 52,5Н ГОСТ 31108-2016, а также песок кварцевый по ГОСТ 8736-2014, крупность частиц которого находилась в диапазоне $0,315 \dots 0,8 \text{ мм}$. Соотношение кварцевого песка к цементу составило 5:1.

Так как крупность песка в разы превышает размеры зёрен цемента, то для определения коэффициента неоднородности использовался гравиметрический метод [10].

Суть метода заключалась в отсеивании предварительно взвешенных полученных проб смеси на сите с размером ячейки 0,2 мм. Таким образом, исключалось попадание частиц песка во фракцию с ключевым компонентом (цементом). После отсеивания проб взвешивался прошедший сквозь сито ключевой компонент, и рассчитывалась его концентрация в каждой из исследуемых проб. Результаты расчёта концентрации фиксировались. Далее по этим значениям с помощью формулы (1) высчитывался коэффициент неоднородности готовой смеси.

Исследование изменения V_c проводилось с использованием метода математического планирования экспериментов ЦКРП 2^3 . В качестве варьируемых факторов приняты угол установки лопастей α , частота вращения лопастных валов n и расстояние c от стержневых элементов до рабочих поверхностей лопастей.

Результаты. Результаты определения коэффициента неоднородности приведены в таблице 1. На основании данных таблицы 1 получено уравнение регрессии, которое адекватно описывает зависимость коэффициента неоднородности от угла установки лопастей α , частоты вращения лопастных валов n и расстояния c от стержневых элементов до рабочих поверхностей лопастей.

Табл. 1. Результаты определения коэффициента неоднородности при варьировании факторов

№ п/п	$n, \text{ с}^{-1}$	$c, \text{ мм}$	$\alpha, \text{ град}$	$V_c, \%$
1	0,8	2,43	24	4,37
2	1,2	2,43	24	4,01
3	0,8	9,57	24	7,87
4	1,2	9,57	24	4,44
5	0,8	2,43	36	4,85
6	1,2	2,43	36	4,96
7	0,8	9,57	36	14,48
8	1,2	9,57	36	5,65
9	0,66	6	30	8,35
10	1,34	6	30	3,15
11	1	0	30	4,45
12	1	12	30	9,35
13	1	6	19,92	4,31
14	1	6	40,08	8,51
15	1	6	30	2,97
16	1	6	30	3,40
17	1	6	30	4,95
18	1	6	30	3,57
19	1	6	30	3,98
20	1	6	30	3,02

В кодированном виде уравнение имеет вид:

$$V_c = 4,024 - 1,518 \cdot X_1 + 1,606 \cdot X_2 + 1,165 \cdot X_3 - 1,43 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,587 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,761 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,515 \cdot X_1^2 + 0,902 \cdot X_2^2 + 0,737 \cdot X_3^2. \quad (2)$$

В натуральной форме уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$V_c = 16,641 - 6,648 \cdot n + 0,538 \cdot c + 0,758 \cdot \alpha - 2,003 \cdot n \cdot c - 0,489 \cdot n \cdot \alpha + 0,026 \cdot c \cdot \alpha + 12,875 \cdot n^2 + 0,071 \cdot c^2 + 0,020 \cdot \alpha^2. \quad (3)$$

С использованием выражение (3) и программного продукта *Maple* были получены зависимости коэффициента неоднородности от варьируемых факторов, которые показаны на рисунке 2.

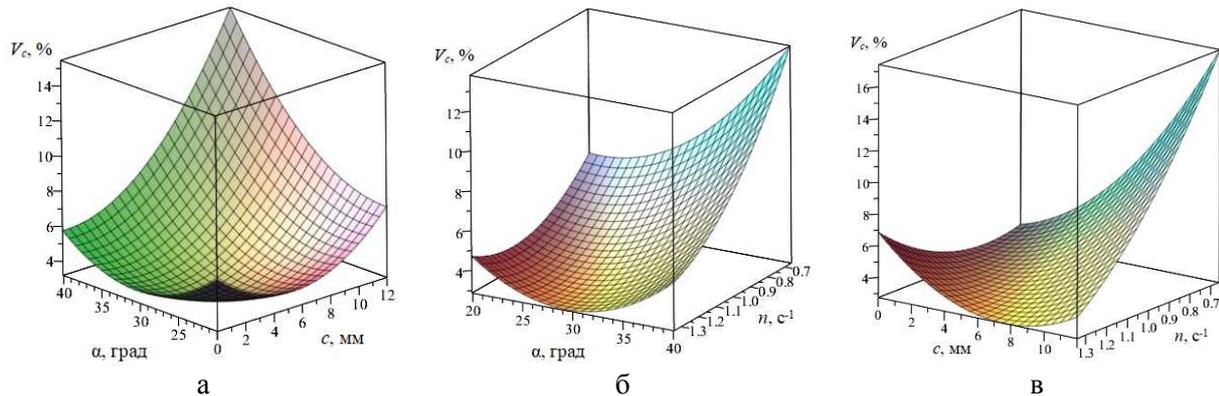


Рис. 2. Зависимости коэффициента неоднородности V_c от: а – угла установки лопасти α и расстояния c между лопастью и стержневыми элементами при $n=1 \text{ c}^{-1}$; б – угла установки лопасти α и частоты вращения лопастных валов n при $c=6 \text{ мм}$; в – от расстояния c между лопастью и стержневыми элементами и частоты вращения лопастных валов n при $\alpha=30^\circ$

Зависимость коэффициента неоднородности от угла установки лопасти и расстояния от её рабочей поверхности до стержневых элементов (рис. 2,а) имеет нелинейный характер. Так, при фиксированных значениях угла установки лопасти $\alpha_1=25^\circ$, $\alpha_2=35^\circ$ и $\alpha_3=40^\circ$ и расстоянии $c_1=0 \text{ мм}$, коэффициент неоднородности принимает соответственно следующие значения: $V_{c11} = 4,48\%$, $V_{c12} = 4,29\%$, $V_{c13} = 5,73\%$. При увеличении расстояния от стержневых элементов до рабочей поверхности лопасти ($c_2=6 \text{ мм}$) и аналогичных значениях угла установки α , коэффициент неоднородности будет равен соответственно: $V_{c14} = 3,56\%$, $V_{c15} = 5,51\%$, $V_{c16} = 8,01\%$. При максимальном значении $c_3=12 \text{ мм}$ и исследуемых значения угла установки лопасти α , коэффициент неоднородности принимает соответственно значения: $V_{c17} = 7,75\%$, $V_{c18} = 11,82\%$, $V_{c19} = 15,39\%$.

Зависимость коэффициента неоднородности от угла установки лопасти и частоты вращения лопастных валов (рис. 2,б) также имеет нелинейный характер. Так при исследуемых углах установки лопасти $\alpha_1=25^\circ$, $\alpha_2=35^\circ$ и $\alpha_3=40^\circ$ и наименьшей частоте вращения лопастных валов $n_1=0,66 \text{ c}^{-1}$, коэффициент неоднородности принимает соответственно значения: $V_{c21} = 6,80 \%$, $V_{c22} = 10,41\%$, $V_{c23} = 13,75\%$. При повышении частоты вращения до $n_2=1,0 \text{ c}^{-1}$ и рассматриваемых значениях угла α , коэффициент неоднородности соответственно будет равен: $V_{c24} = 3,56\%$, $V_{c25} = 5,51\%$, $V_{c26} = 8,01\%$. При максимальной частоте вращения валов $n_3=1,34 \text{ c}^{-1}$ и указанных значениях угла установки лопасти α , коэффициент неоднородности принимает соответственно следующие значения: $V_{c27} = 3,30\%$, $V_{c28} = 3,58\%$, $V_{c29} = 5,26\%$.

Зависимость коэффициента неоднородности от частоты вращения лопастных валов и расстояния от стержневых элементов до рабочей поверхности лопасти показана на рисунке 2,в. При исследуемых значениях частоты вращения $n_1=0,66 \text{ c}^{-1}$, $n_2=1,0 \text{ c}^{-1}$, $n_3=1,34 \text{ c}^{-1}$ и минимальном расстоянии $c_1=0 \text{ мм}$, коэффициент неоднородности принимает соответственно следующие значения: $V_{c31} = 3,86\%$, $V_{c32} = 3,87\%$, $V_{c33} = 6,87\%$. С увеличением расстояния между стержневыми элементами и рабочей поверхностью лопасти до $c_2=6 \text{ мм}$, коэффициент

неоднородности соответственно равен: $V_{c34} = 8,09\%$, $V_{c35} = 4,02\%$, $V_{c36} = 2,93\%$. При максимальном расстоянии $c_3=12$ мм и рассматриваемых значениях частоты вращения лопастных валов, коэффициент неоднородности соответственно будет равен: $V_{c37} = 15,07\%$, $V_{c38} = 7,75\%$, $V_{c39} = 3,40\%$.

С помощью программного продукта «*Maple*» были найдены минимумы и максимумы уравнения регрессии в зависимости от сочетания рассматриваемых факторов. Так, максимальный коэффициент неоднородности смеси $V_{c\max}=17,43\%$ достигается при $n_1=0,66$ с⁻¹, $c_3=12$ мм, $\alpha_3=40^\circ$. Минимальное значение $V_{c\min} = 2,63\%$ достигается при значениях $n_3=1,34$ с⁻¹, $c_4=8$ мм, $\alpha_4=27^\circ$.

Выводы

1. Показана целесообразность использования двухвальных лопастных смесителей в производстве строительных материалов и возможность интенсификации в них процесса смешивания путем установки цилиндрических стержневых элементов перед рабочими поверхностями лопастей.

2. С использованием экспериментальной модели лопастного смесителя и метода математического планирования экспериментов проведены исследования процесса подготовки сухой цементно-песчаной смеси. Получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость коэффициента ее неоднородности V_c от частоты вращения лопастных валов n , угла установки лопастей α относительно плоскости их вращения и расстояния c между рабочими поверхностями лопастей и стержневыми элементами.

3. С использованием программного продукта *Maple* выполнено исследование полученного уравнения регрессии. Установлено влияние варьируемых факторов на значения функции. Минимальная величина коэффициента неоднородности $V_{c\min} = 2,63\%$ достигается при следующих значениях варьируемых факторов: $n_3=1,34$ с⁻¹, $c_4=8$ мм, $\alpha_4=27^\circ$.

Список литературы

1. Андиферов С.И., Пахотин Е.Г. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей // VII Международный молодежный форум «Образование, наука, производство». – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 1402-1405.
2. Титов А.Ю. Конструкционные предпосылки модернизации лопастных смесителей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1. – С. 77-79.
3. Хольшев Н.В., Мухин В.А., Петрова С.С. Определение параметров шнеколопастного смесителя // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1. – С. 28-37.
4. Уваров В.А., Орехова Т.Н., Краснов В.В. Анализ оборудования непрерывного действия для смешивания сухих многокомпонентных смесей // Научный альманах. – 2016. – №10. – С. 313-315.
5. Коновалов В.В., Терюшков В.П., Чупшев А.В., Коновалов В.В. Оптимизация технологических параметров смесителя с комбинированным рабочим органом // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 83-87.
6. Шеметова О.М. Процесс смешивания компонентов сыпучего материала в пневматическом смесителе // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-2. – С. 273-279. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-273-279.
7. Пасько А.А., Демин О.В. Моделирование движения потоков сыпучего материала при обтекании пластины // Математические методы в технике и технологиях: Сб. XV Междунар. науч. конф: В 10-ти т. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – Т. 10. – Секция 10. – С. 56-57.
8. Демин О.В., Першин В.Ф., Смолин Д.О. Интенсификация смешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе // Химия и химическая технология. – 2012. – №8. – С. 108-111.
9. Кикин Н.О. Интенсификация процесса смешивания в смесителе принудительного действия путем устранения уплотнения из смешиваемого материала перед лопастью // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №7. – С. 27-32. – DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-27-32.
10. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
11. Лозовая С.Ю., Рысиков М.С. Исследование изменения коэффициента неоднородности сухих строительных смесей // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 113-117.

12. Ханин С.И., Кикин Н.О., Мордовская О.С. Исследование возможности повышения качества подготовки сухих строительных смесей в горизонтальном лопастном смесителе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – №10. – С. 99-108. – DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-99-108.

References

1. Antsiferov S.I., Pakhotin E.G. Analysis of the modern market for equipment for the production of dry building mixtures // VII International Youth Forum "Education, Science, Production". – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2015. – P. 1402-1405.
2. Titov A.Yu., Mukhin V.A., Petrova S.S. Structural prerequisites for the modernization of paddle mixers // News of the Orenburg State Agrarian University. 2017, no. 1, pp. 77-79.
3. Kholshv N.V. Determination of the parameters of the screw mixer // News of the Samara State Agricultural Academy. 2019, no. 1, pp. 28-37.
4. Uvarov V.A., Orekhova T.N., Krasnov V.V. Analysis of continuous equipment for mixing dry multicomponent mixtures // Scientific almanac. 2016, no. 10, pp. 313-315.
5. Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Chupshev A.V., Konovalov V.V. Optimization of technological parameters of a mixer with a combined working part // News of the Samara State Agricultural Academy. 2014, no. 3, pp. 83-87.
6. Shemetova O.M. The process of mixing bulk material components in a pneumatic mixer // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 17-2, pp. 273-279. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-273-279.
7. Pasko A.A., Demin O.V. Modeling of the movement of flows of bulk material during flow around a plate // Mathematical methods in engineering and technology: Proc. XV International scientific conf: In 10 vol. – Tambov: Publ. house of Tamb. state tech. university, 2002. – Vol. 10. – Section 10. – P. 56-57.
8. Demin O.V., Pershin V.F., Smolin D.O. Intensification of mixing bulk materials in a paddle mixer. – Chemistry and chemical technology. 2012, no. 8, pp. 108-111.
9. Kikin N.O. Intensification of the mixing process in a forced mixer by eliminating the compaction from the mixed material before the blade // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2020, no. 7, pp. 27-32. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-7-27-32.
10. Makarov Yu.I. Apparatus for mixing bulk materials. – M.: Mechanical Engineering, 1973. – 216 p.
11. Lozovaya S.Yu., Rysikov M.S. Study of the change in the coefficient of heterogeneity of dry building mixtures // Science and innovations in construction: Collection of reports of the VI International scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Construction and Urban economy. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2022. – P. 113-117.
12. Khanin S.I., Kikin N.O., Mordovskaya O.S. Study of the possibility of improving the quality of preparation of dry building mixtures in a horizontal paddle mixer // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2021, no. 10, pp. 99-108. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-99-108.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Кикин Николай Олегович – аспирант nikolaykikin@gmail.com	Kikin Nikolay Olegovich – postgraduate student
--	---

Получена 15.01.2023