УДК 69:666.94 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1367-1385

Роторно-винтовые системы для приготовления цементного клинкера

Г.В. Серга, К.А. Белокур, Э.А. Хвостик
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (Кубанский ГАУ), 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13

АННОТАЦИЯ
Введение. Представлен подход к исследованию роторно-винтовых систем для производства клинкера цемента. Основные задачи в производстве цементного клинкера во вращающейся печи, корпус которой имеет горизонтальное положение, — уменьшение габаритов печи, повышение производительности, упрощение эксплуатации, уменьшение энергоемкости. Рассмотрены конструкции оборудования, позволяющие решить данные задачи.
Материалы и метод. Применялся комплексный метод исследований. Аналитические методы позволили создать методику расчета винтового корпуса вращающейся печи для приготовления цементного клинкера. Поиск конструкций винтовых корпусов выполнялся методами начертательной геометрии и инженерной графики с помощью программного комплекса «Компас-3D». Проведены аналитические исследования физических явлений, происходящих в зоне контакта гранул цементного клинкера. Применялся аппарат безразмерных кинематических функций (инвариантов подобия) и анализа размерностей. Применение инвариантов подобия дало возможность исследовать не один какой-либо случай, а бесчисленное множество различных случаев, объединенных некоторой общностью свойств. Экспериментальные исследования проводились на моделях, с целью подтверждения достоверности теоретических положений и аналитических зависимостей.
Результаты. Представлены результаты исследования роторно-винтовых систем для производства клинкера цемента. Предложены конструкции винтовых корпусов вращающихся печей, которые в сравнении с известными конструкциями аналогичного назначения, существенно повышают производительность, сокращают габариты, массу печей и энергозатраты, за счет выполнения их с винтовыми канавками.
Выводы. Предложены технические решения, защищенные 17 патентами РФ. Представлены технологии и конструктивные схемы оборудования, предназначенные для повышения скорости вращения винтообразного корпуса у вращающей печи в несколько раз, что дает повышение производительности и уменьшение габаритов вращающейся печи. Новизна проведенных исследований заключается в получении зависимостей для вычисления скорости продольного перемещения гранул цементного клинкера в винтовом корпусе вращающихся печей, а также в создании новой классификации роторно-винтовых систем для приготовления цементного клинкера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: винтовой корпус, винтовые линии, винтовые поверхности, роторно-винтовые системы, гранулы цементного клинкера, инварианты подобия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Серга Г.В., Белокур К.А., Хвостик Э.А.* Роторно-винтовые системы для приготовления цементного клинкера // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 11. С. 1367–1385. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1367-1385

Rotor-screw systems for preparation of cement clinker

Georgi V. Serga, Kirill A. Belokur, Eduard A. Khvostik
Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Kuban SAU), 13 Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation

ABSTRACT
Introduction. Presents an approach to research rotor-screw systems for cement clinker production. Main tasks in the production of cement clinker in a rotary furnace whose housing is horizontal are reducing the size, increasing productivity, simplifying the operation, reducing the energy intensity. Considered equipment construction, allowing to solve these problems.
Materials and method. A comprehensive research method was used in the work. Analytical methods have made it possible to create a methodology for calculating the screw housing of a rotary kiln for the preparation of cement clinker. The search for designs of screw housings was performed using descriptive geometry and engineering graphics using the Kompas-3D software package. An analytical study of physical phenomena occurring in the contact zone of cement clinker granules used an apparatus of dimensionless kinematic functions (similarity invariants) and dimensional analysis. The application of similarity invariants made it possible to investigate not just one case, but an infinite number of different cases, united by some commonness of properties. Experimental studies were carried out on models to confirm the validity of theoretical positions and analytical dependencies.
Results. The results of research of rotor-screw systems for cement clinker production are presented. The designs of screw housings for rotary kilns are proposed. They, in comparison with known designs of a similar purpose, significantly increase productivity, reduce the dimensions, weight of furnaces and power consumption, due to their implementation with screw grooves.
Conclusions. Technical solutions protected by 17 patents of the Russian Federation are offered. The proposed technologies and design schemes of equipment are designed to increase the rotational speed of the screw-like housing at the rotary kiln

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • **Том 13 Выпуск 11, 2018**
Volume 13 Issue 11, 2018

© Г.В. Серга, К.А. Белокур, Э.А. Хвостик, 2018

several times, which will give us an increase in productivity, while reducing the dimensions of the rotary kiln. The novelty of the research is to obtain dependencies for calculating the speed of longitudinal movement of cement clinker granules in the screw casing of rotary kilns, as well as to create a new classification of rotary-screw systems for the preparation of cement clinker.

KEYWORDS: screw housing, screw lines, screw surfaces, rotor-screw systems, cement clinker granules, similarity invariants

FOR CITATION: Serga G.V., Belokur K.A., Khvostik E.A. Rotor-screw systems for the preparation of cement clinker. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(11):1367-1385. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1367-1385

ВВЕДЕНИЕ

В производстве цемента при обжиге частиц сырьевой смеси применяют вращающиеся печи, в результате получаются гранулы цементного клинкера. В течение последних 20 лет в данной области промышленности, произошел рост мощностей, в пять раз увеличилась производительность одного обжигаемого аппарата. Широкое применение в промышленности получили вращающиеся печи 4,5×170; 5×185; 5,6×185 с корпусом цилиндрической формы [1–8].

Процесс приготовления цементного клинкера с использованием вращающих печей отличают особенности транспортировки сырьевой смеси, которая осуществляется за счет создания уклона корпуса от загрузки к выгрузке. Следствием этого являются потери в процессе теплообмена, ограничение технологических возможностей эксплуатации, удлиненные габариты. Устранению этих недостатков способствует использование винтового корпуса, его горизонтальное расположение увеличивает скорость вращения. Предложенные технические решения решают эту задачу [18–34]. В таких печах для производства клинкера технико-экономические преимущества обеспечиваются вследствие продольного перемещения частиц сырьевой смеси при горизонтальном расположении винтового корпуса вращающейся печи и создания их встречных потоков. Винтовые поверхности и винтовые канавки, расположенные в винтовом корпусе, способствуют перемещению гранул цементного клинкера и интенсивному их взаимодействию друг с другом и поверхностью винтового корпуса. Новизна проведенных исследований заключается не только в изучении физических явлений, сопровождающих процесс контакта гранул цементного клинкера, в том числе оценке скорости упругого скольжения, оценке контактных напряжений, мощности расходуемой при продольном перемещении гранул цементного клинкера, но и в получении зависимостей для вычисления скорости продольного перемещения гранул цементного клинкера в винтовом корпусе вращающихся печей, а также в создании новой классификации роторно-винтовых систем для приготовления цементного клинкера.

Конструкциям вращающихся печей для приготовления клинкера присущ наклон корпуса к горизонту для обеспечения перемещения гранул цементного клинкера от загрузки к выгрузке [9, 10]. Для таких печей характерны большие габариты по длине, сложность эксплуатации, медленное вращение корпуса, технологическая ограниченность и потери теплообмена [9–15]. Эти недостатки можно устранить на основании проведенных нами исследований [10–17], путем устройства оси вращения винтового корпуса горизонтально поверхности, что позволит повысить скорость его вращения в десятки раз и улучшит другие эксплуатационные свойства. В Кубанском государственном аграрном университете им. И.Т. Трубилина в течение последних десяти лет были предложены конструкционные решения, устраняющие имеющиеся недостатки [18–34] и обеспечивающие пути внедрения в производственный цикл приготовления клинкера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 1 изображен общий вид вращающейся печи с осью вращения расположенной горизонтально.

Такие конструкции с горизонтальным расположением оси вращения способствуют повышению интенсивности процесса смешивания сырьевой смеси. Нет необходимости в монтаже уклона, очевидные достоинства — возможность увеличения скорости вращения и прироста теплообмена. Описание фукционирования конструкции приведено в работе [23].

На рис. 2 показан винтовой корпус вращающейся печи для приготовления цементного клинкера.

Технико-экономические преимущества появляются за счет создания на внутренней поверхности винтового корпуса плавных винтовых канавок и внутренних поверхностей двоякой кривизны. Это не только расширяет технологические возможности и обеспечивает перемещение гранул цементного клинкера от загрузки к выгрузке при горизонталь-

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

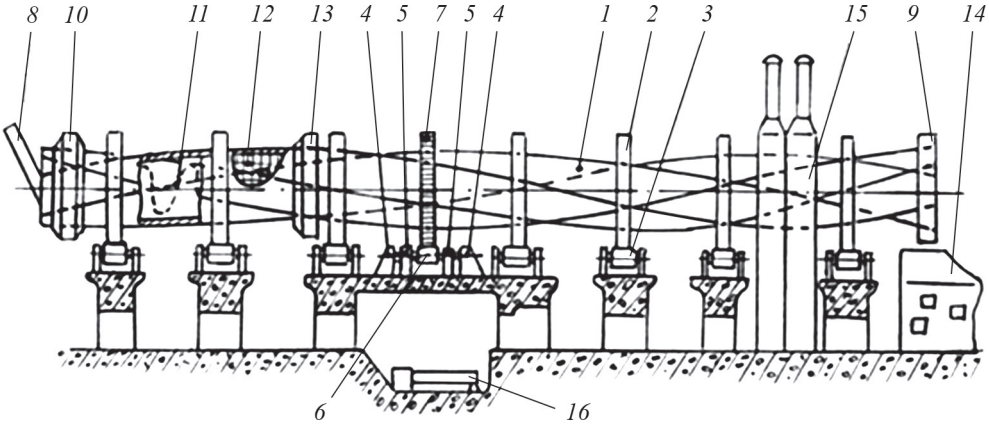


Рис. *1***.** Вращающаяся печь для приготовления цементного клинкера: *1* — винтовой корпус; *2* — бандажи; *3* — опорные ролики; *4* — электродвигатели; *5* — два редуктора; *6* — две подвенцовые шестерни; *7* — венцовое колесо; *8* — питательная труба; *9* — головка для подачи топлива и воздуха; *10* — подогрев; *11* — завеса; *12* — обменник тепла; *13* — перезагружатель; *14* — холодильник; *15* — водяное охлаждение; *16* — аппарат смазки

Fig. *1***.** Rotary kiln for preparation of cement clinker: *1* — screw housing; *2* — bandages; *3* — support rollers; *4* — electric motors; *5* — two reducer; *6* — two under ring of the gear; *7* — ring wheel; *8* — feed-pipe; *9* — head for supply of fuel and air; *10* — preheating; *11* — riddle; *12* — heat exchanger; *13* — reboot; *14* — refrigerator; *15* — water cooling; *16* — machine of the greasing

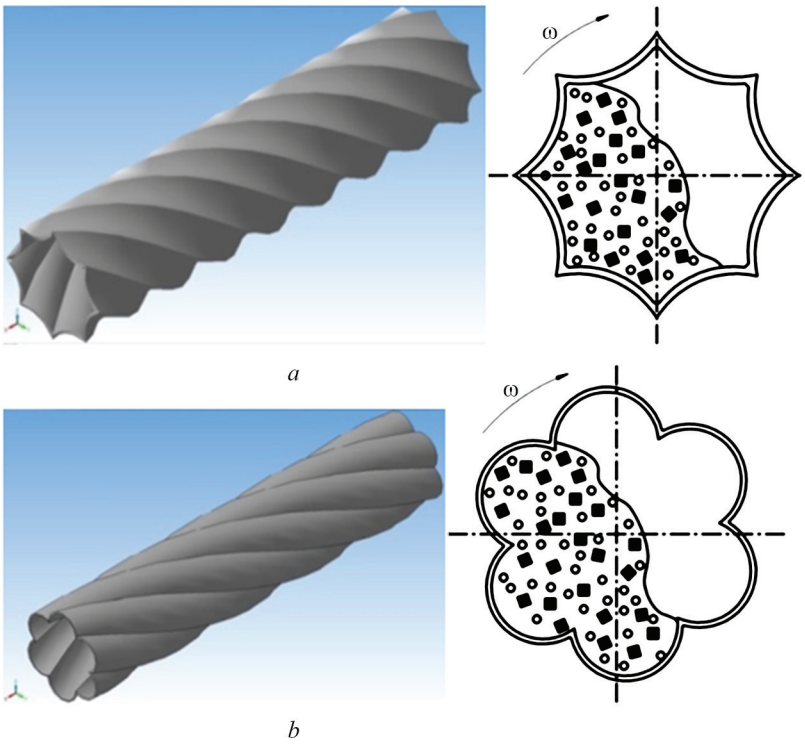


Рис. 2. Наглядные изображения и сечение винтового корпуса *1* вращающейся печи с центрами кривизны, расположенными: *a* — снаружи поперечного сечения винтового корпуса *1*; *b* — внутри поперечного сечения винтового корпуса *1*

Fig. 2. Illustrative images and section of screw housing *1* of rotary kiln with curvature centers: *a* — located outside the cross section of the screw housing *1*; *b* — inside the cross section of the screw housing *1*

ном расположении оси вращения винтового корпуса печи, но и повышает интенсивность теплообмена и упрощает эксплуатацию вращающейся печи при ее горизонтальном расположении.

Для представления сложности процессов, происходящих при вращении винтового корпуса *1* и движения частиц сырьевой смеси, на рис. 2 показаны их наглядные изображения и сечение; цен-

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Том 13 Выпуск 11, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Volume 13 Issue 11, 2018

тры кривизны винтового корпуса *1* располагаются снаружи (рис. 2, *a*) и внутри (рис. 2, *b*). Поиск конструкций винтовых корпусов выполнялся методами начертательной геометрии и инженерной графики с помощью программного комплекса «Компас-3D».

Производительность вращающейся печи зависит от внутреннего объема V полости винтового корпуса вращающейся печи, при этом объем V винтового корпуса пропорционален площади проходного (поперечного) сечения винтового корпуса и пропорционален радиусу его проходного сечения [9, 10].

Для выбора оптимального количества винтовых линий винтового корпуса вращающейся печи рассмотрим поперечные сечения винтового корпуса (рис. 3):

1) корпус винтовой вращающейся печи с выпуклыми и вогнутыми поверхностями с тремя винтовыми ребрами (рис. 3, *a*);

2) корпус винтовой вращающейся печи с выпуклыми и вогнутыми поверхностями с четырьмя винтовыми ребрами (рис. 3, *b*);

3) корпус винтовой вращающейся печи с выпуклыми и вогнутыми поверхностями с пятью винтовыми ребрами (рис. 3, *c*);

4) корпус винтовой вращающейся печи с выпуклыми и вогнутыми поверхностями с шестью винтовыми ребрами (рис. 3, *d*).

Зададим для всех случаев выпуклой винтовой поверхности, что R — радиус кривизны, S — площадь проходного сечения (рис. 3).

Введены обозначения для печей, имеющих вогнутую поверхность оснащенную тремя, четырьмя, пятью и шестью винтовыми ребрами, обозначения радиуса R_1, R_2, R_3, R_4 и площади проходного сечения S_1, S_2, S_3, S_4 соответственно.

Для рис. 3, *a*, *b*, *c*, *d* отношения проходного сечения винтовых поверхностей с выпуклыми и вогнутыми формами имеют соответственно вид (1)–(4).

Тогда, отношения площадей проходного сечения выпуклой и вогнутой винтовой поверхности имеют вид:

$$i_1 = \frac{S_1}{S} = \frac{R_1}{R} = 0,1, \quad (1)$$

$$i_2 = \frac{S_2}{S} = \frac{R_2}{R} = 0,386, \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{S_3}{S} = \frac{R_3}{R} = 0,64, \quad (3)$$

$$i_4 = \frac{S_4}{S} = \frac{R_4}{R} = 0,73. \quad (4)$$

Как видно из рис. 3:

$$S_1 < S_2 < S_3 < S_4 < S. \quad (5)$$

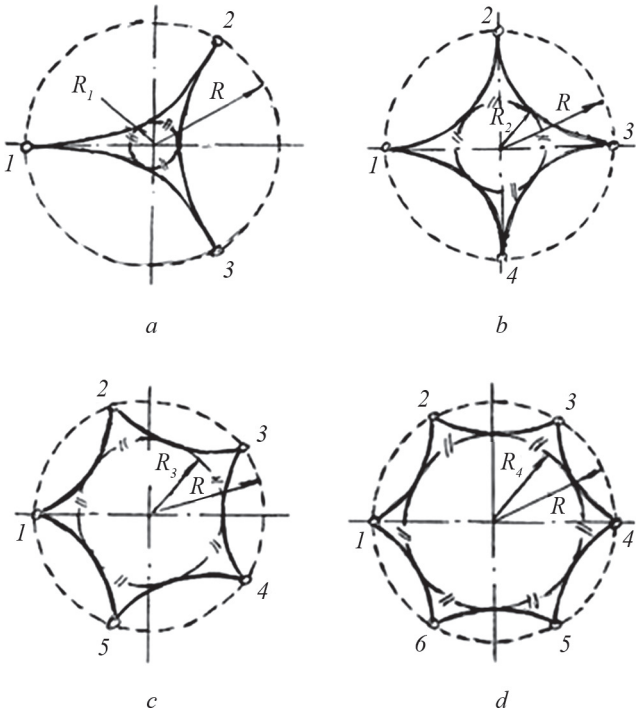


Рис. 3. Сечение винтового корпуса вращающейся печи с: *a* — вогнутая винтовая поверхность с тремя винтовыми ребрами; *b* — выпуклая винтовая поверхность с четырьмя винтовыми ребрами; *c* — выпуклая винтовая поверхность с пятью винтовыми ребрами; *d* — выпуклая винтовая поверхность с шестью винтовыми ребрами

Fig. 3. The section of screw housing of rotary kiln with: *a* — concave screw surface with three screw ribs; *b* — convex screw surface with four screw ribs; *c* — convex screw surface with five screw ribs; *d* — convex screw surface with six screw ribs

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018



Рис. 4. График зависимости количества винтовых ребер (*n*) к *I*-отношению проходного сечения выпуклой винтовой поверхности

Fig. 4. Dependency graph of amount screw ribs (*n*) to *i*-to ratio pass section of convex screw surface

График зависимости количества ребер винтового корпуса *n* к *i*-отношению проходного сечения выпуклой винтовой поверхности к площади вогнутой винтовой поверхности изображен рис. 4. Эта зависимость показывает, что количество винтовых ребер *n* должно быть больше 6 ($n > 6$), для достижения проходного сечения. На основе накопленного опыта в данной области, ширина листов для монтажа винтового корпуса должна быть не менее 400 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ПРОЦЕСС КОНТАКТА ГРАНУЛ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ИХ ПРОДОЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

Анализ работы вращающейся печи для приготовления цементного клинкера с использованием роторно-винтовых систем демонстрирует, что на сложное пространственное движение гранул цементного клинкера определенное влияние, при вращении винтового корпуса вращающейся печи, оказывает достаточно сложная пространственная геометрия углов, образованных ребрами и плоскими элементами его периметра, среди которых угол наклона образующей винтовой линии $j = \text{const}$ к оси вращения винтового корпуса вращающейся печи следует считать основным, потому что он определяет характер перемещения вдоль винтовых линий. Цементным клинкером называют спекшуюся сырьевую смесь в виде гранул размером до 40 мм (рис. 5) [9].

Поэтому, вначале проведем аналитическое исследование физических явлений, происходящих в зоне контакта гранул цементного клинкера. Ввиду бесчисленного множества возможных решений при решении этой задачи необходимо сопоставить соответствующие величины. Для этих целей в последние годы широко применяется аппарат безразмерных кинематических функций (инвариантов подобия) и анализа размерностей.



Рис. 5. Гранулы цементного клинкера

Fig. 5. Cement clinker granules

Для механического движения, каким является сложное пространственное движение гранул цементного клинкера, он может быть выражен математически в виде функции обобщенных координат и критериев механического подобия. При этом уменьшается число переменных параметров, и влияние отдельных факторов отражается не порознь, а в совокупности. Более отчетливо выделяются внутренние связи, характеризующие протекание процесса движения гранул цементного клинкера. Вся количественная и качественная картина процесса становится более ясной. Важно и то, что применение инвариантов подобия дает возможность исследовать не один какой-либо случай, а бесчисленное множество различных случаев, объединенных некоторой общностью свойств [35–37].

Оценка скорости упругого скольжения в зоне контакта гранул цементного клинкера

В зоне контакта гранул цементного клинкера процессы, в той или иной мере уже изученные. Од-

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Том 13 Выпуск 11, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Volume 13 Issue 11, 2018

нако ряд явлений, сопровождающих цикл контакта, еще мало исследован и не описан в литературе.

Рассмотрим зону контакта (схему) гранул цементного клинкера, на которую действует сила R_n и площадку контакта $2a \times 1$ (рис. 6), где $P_n = \frac{R_n}{b}$ — центральная нагрузка на 0,1 см ширины контакта гранул цементного клинкера; ω_1 и ω_2 — угловые скорости гранул цементного клинкера; b — длина полоски контакта.

Площадку контакта из-за небольших размеров b сравнительно с диаметрами двух гранул цементного клинкера (далее 1-ая и 2-ая гранулы), а также с внутренней поверхностью винтового корпуса печи, считаем плоскостью, проходящей через их параллельные образующие A и B.

Полюсом в относительном плоском движении 1-ой гранулы цементного клинкера со 2-ой гранулой является некоторая точка касания центроидных кругов, положение которой определяется условиями:

$$\omega_1 \cdot r_{1ц} = \omega_2 \cdot r_{2ц}\omega_1, \tag{6}$$

$$r_{1ц} + r_{2ц} = r_1 + r_2 - W = A, \tag{7}$$

$$r_{2ц} = r_{1ц} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{2ф}} = r_{1ц} \cdot \frac{\omega_1}{\theta \cdot \omega_2} \text{ и } r_{1ц} = \frac{A}{1 + \frac{i_{21}}{\theta}}, \text{ где } i_{21} = \frac{r_2}{r_1}, \tag{8}$$

$$r_2 = A - r_{1ц} = A\left(1 - \frac{1}{1 + \frac{i_{21}}{\theta}}\right) = \frac{A}{1 + \frac{\theta}{i_{21}}}, \tag{9}$$

где $\omega_{2ф}$ — угловая скорость 2-ой гранулы цементного клинкера с учетом относительного скольжения; $\theta = \frac{\omega_{2ф}}{\omega_2}$ — коэффициент скольжения; $i_{21} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ — передаточное отношение.

Рассмотрим кинематику точек $К_1$ и $К_2$, принадлежащих поверхностям 1-ой и 2-ой гранул цементного клинкера соответственно точке:

переносная скорость: $V_{к1} = \omega_1 \cdot r_{1x}$;

относительная скорость: $V_{к1n} = V_{к1} \cdot \operatorname{tg}\varphi$; (10)

абсолютная скорость: $V_{к1x} = \frac{V_{к1}}{\cos\varphi}$.

Величина радиуса

$$r_{1x} = r_1 \cdot \frac{\cos\varphi_m}{\cos\varphi}, \tag{11}$$

где

$$\sin\varphi_m = \frac{a}{r_1} \text{ и } \cos\varphi_m = \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r_1}\right)^2}.$$

С учетом (10) и (11), найдем абсолютную скорость точки $V_{к1x}$:

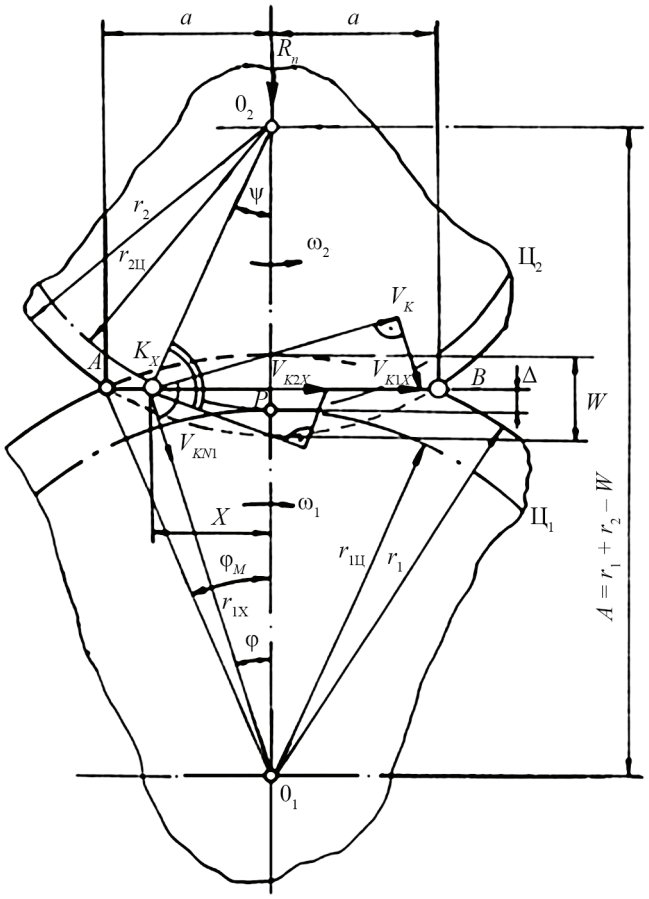


Рис. 6. Схема взаимодействия гранул цементного клинкера

Fig. 6. Interaction scheme of cement clinker granules

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

$$V_{к1x}\cdot\omega_1 = r_1\cdot\frac{\cos\varphi_m}{\cos^2\varphi} = \omega_1\cdot r_1\cdot\frac{\sqrt{1-\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}}{1-\left(\frac{x}{r_1}\right)^2}\approx\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}{1-\left(\frac{x}{r_1}\right)^2}\omega\cdot r_1. \quad (12)$$

С учетом:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{X}{r_{1\cdot\cos\varphi_m}}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{X}{r_1\cdot\sqrt{1-\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}}\right)^2}},$$

применяя методы вычислений с числами, мало отличающимися от единицы $\alpha \rightrightarrows 0$, введем упрощения:

$$\sqrt{1\pm\alpha} = 1\pm 0,5\alpha;\ \frac{1}{1\pm\alpha} = 1\mp\alpha;\ (1\pm\alpha)^2 = 1\pm 2\alpha,$$

и будем считать:

$$\cos\varphi = 1-0,5\cdot\left(\frac{X}{r_1}\right)^2\cdot\left[1+0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2\right]\approx 1-0,5\left(\frac{X}{r_1}\right)^2;$$

$$\cos^2\varphi\approx 1-\left(\frac{X}{r_1}\right)^2.$$

По аналогии определим абсолютную скорость точки:

$$V_{к2x} = \omega_2\cdot r_2\cdot\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_2}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_2}\right)^2}. \quad (13)$$

Скорость упругого скольжения, связанная с относительными скоростями деформаций:

$$V_{ксх} = V_{к1x} - V_{к2x} = \omega_1\cdot r_1\cdot\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_1}\right)^2} - \omega_{2\phi}\cdot r_2\cdot\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_2}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_2}\right)^2} =$$

$$= \omega_1\cdot r_1\cdot\left[\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_1}\right)^2} - \frac{\omega_{2\phi}\cdot r_2}{\omega_1\cdot r_1}\cdot\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_2}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_2}\right)^2}\right],$$

а с учетом (9):

$$V_{ксх} = \omega_1\cdot r_1\cdot\left[\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_1}\right)^2} - \theta\cdot\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_2}\right)^2}{1-\left(\frac{X}{r_2}\right)^2}\right] \quad (14)$$

или

$$V_{ксх} = \omega_1\cdot r_1\cdot\left[\delta - 0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{X}{r_1}\right)^2 + 0,5\cdot\theta\cdot\left(\frac{a}{r_2}\right)^2 - \theta\cdot\left(\frac{X}{r_2}\right)^2\right], \quad (15)$$

где $\delta = 1-\theta$ — коэффициент относительного скольжения:

$$\delta = 1-\theta = 1-\frac{\omega_{2\phi}}{\omega_2} = \frac{\omega_2-\omega_{2\phi}}{\omega_2} = \frac{V_2-V_{2\phi}}{V_2} = \frac{V_{отн}}{V_2}.$$

С учетом (14) запишем:

$$\frac{V_{ксх}}{\omega_1\cdot r_1} = \frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}{1-\chi^2\left(\frac{a}{r_1}\right)^2} - \theta\frac{1-0,5\left(\frac{a}{r_2}\right)^2}{1-\chi\left(\frac{a}{r_2}\right)^2} = \Pi_1 - \theta\Pi_2,$$

где $\chi = \frac{X}{a}\Pi_1$ — первый член в виде дроби и Π_2 — второй.

При $\chi < 0,5\Pi_1 < 1$ и $\Pi_2 < 1$.

При $\chi > 0,5\Pi_1 > 1$ и $\Pi_2 > 1$.

Преобразуем формулу (15) к виду

$$V_{ксхи} = \frac{V_{ксх}}{\omega_1\cdot r_1} = \delta - \left(0,5-\chi^2\right)\cdot\left[\left(\frac{a}{r_1}\right)^2 + \theta\left(\frac{a}{r_2}\right)^2\right] = \delta - \left(0,5-\chi^2\right)\cdot q = \delta - u\cdot q. \quad (16)$$

Давая конкретные значения величинам

$$\left(\frac{a}{r_1}\right),\ \left(\frac{a}{r_2}\right),\ \theta,\ \delta = 1-\theta,\ \chi,$$

т.е. δ, q, χ найдем значения $V_{ксхи}$, обеспечивающие построение номограмм $V_{ксхи}(\delta, q, \chi)$.

Заслуживает внимания множитель $\left(0,5-\chi^2\right)$.

Так как $0<\chi<1,0$, то величина $0,5-\chi^2 = f(\chi)$ выразится частными значениями (табл. 1).

Величину $q = \left(\frac{a}{r_1}\right)^2 + \theta\left(\frac{a}{r_2}\right)^2$ с вполне пренебрежительным округлением можно приближенно считать равной:

$$q = \left(\frac{a}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{a}{r_2}\right)^2 = \left(\frac{a}{r_1}\right)^2\left(1+\frac{1}{i_{21}^2}\right). \quad (17)$$

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018 Volume 13 Issue 11, 2018

Табл. 1. Частные значения $0,5 - \chi^2 = f(\chi)$

Table 1. Private values $0,5 - \chi^2 = f(\chi)$

χ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$u = 0,5 - \chi^2$	0,5	0,49	0,46	0,4	0,34	0,25	0,14	0,01	–0,14	–0,34	–0,5

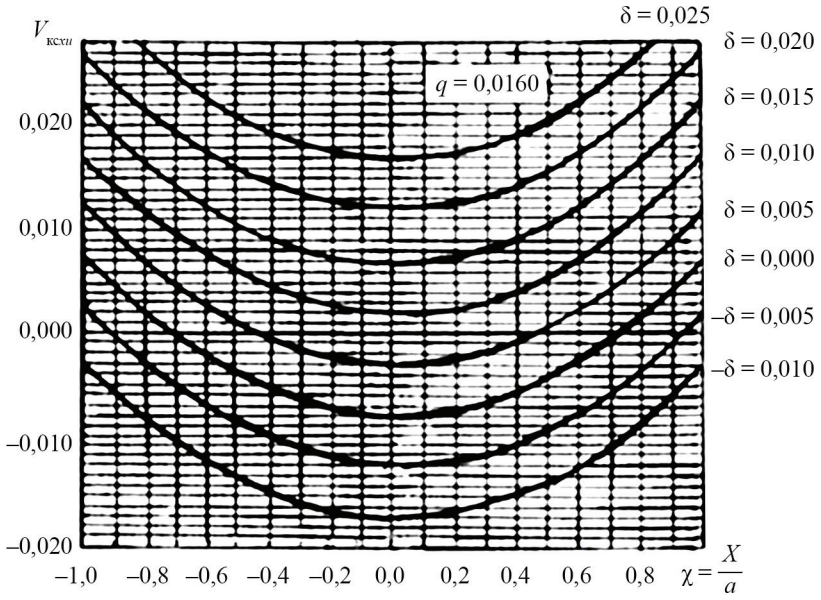


Рис. 7. Номограмма $V_{кс\chi u} = \frac{V_{кс\chi}}{\omega_1 \cdot r_1} = \int(\delta,\ \chi)$ при $q = 0,0160$

Fig. 7. Nomogram $V_{кс\chi u} = \frac{V_{кс\chi}}{\omega_1 \cdot r_1} = \int(\delta,\ \chi)$, at $q = 0.0160$

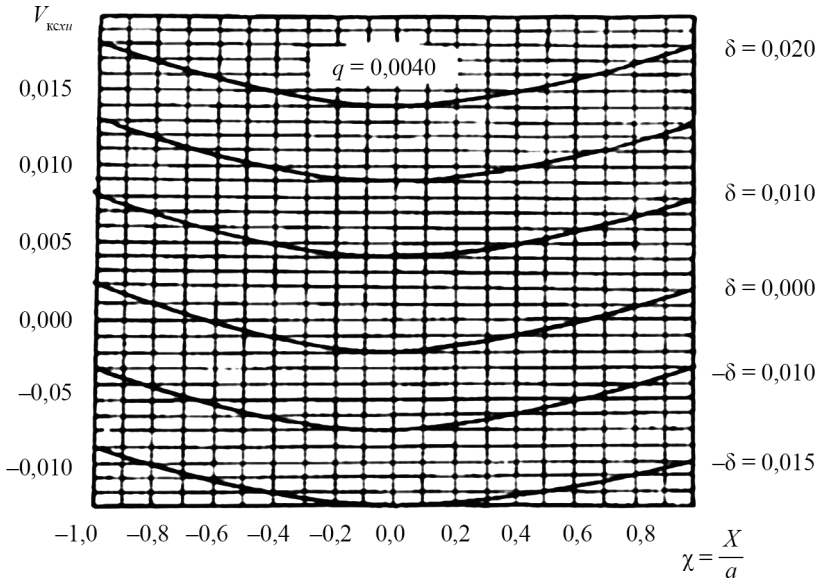


Рис. 8. Номограмма $V_{кс\chi u} = \frac{V_{кс\chi}}{\omega_1 \cdot r_1} = f_{vc}(\delta_1 \chi)$, при $q = 0,0040$

Fig. 8. Nomogram $V_{кс\chi u} = \frac{V_{кс\chi}}{\omega_1 \cdot r_1} = f_{vc}(\delta_1 \chi)$, at $q = 0.0040$

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

Номограмма $V_{ксхи}(\chi, \delta)$ при q = 0,0160 (a = = 0,024 см, r_1 = 0,6 см, r_1 = 0,2 см) скоростей упругого скольжения $V_{ксхи}$ в инвариантном виде по половинке площадки контакта AB гранул цементного клинкера рассчитанная по формуле (16) имеет вид представленный на рис. 7.

Нижняя кривая соответствует значению $\delta = 0{,}0$, когда $V_{ксхи} < 0$ до $\chi = 0{,}705$ $V_{ксхи} > 0$ при $\chi = 0{,}705$.

На рис. 8 представлена номограмма того же типа, что и на рис. 7, при $q = 0{,}0040$.

Анализ номограмм свидетельствует, что при $\delta > 0{,}0070$ и $q = 0{,}0160$ относительное упругое скольжение остается положительным на протяжении всего цикла контакта.

При $\delta > 0{,}0070$ существует зона отрицательных смещений поверхности 1-ой гранулы относительно 2-ой гранулы цементного клинкера. Совершенно очевидно, что фрикционное вращение 2-ой гранулы цементного клинкера возможно лишь в том случае, когда силы трения в зонах положительных $V_{ксхи}$ больше, чем силы трения в зонах отрицательных $V_{ксхи}$.

Для определения условий равновесного установившегося процесса контактирования гранул цементного клинкера проанализируем силовые параметры их контактирующих поверхностей.

Оценка контактных напряжений в зоне контакта гранул клинкера

Как следует из контактной задачи [38], максимальное контактное напряжение в цилиндрах с параллельными осями, пренебрегая округлением, можно принять соответствующим наибольшему давлению q_0 по линии контакта AB при соприкосновении гранул цементного клинкера и выразить величиной

$$q_0 = 0{,}798\sqrt{\frac{P_n\dfrac{D_1 + D_2}{D_1 \cdot D_2}}{\dfrac{1-\mu_1^2}{E_1}+\dfrac{1-\mu_2^2}{E_2}}}, \qquad (18)$$

где $P_n = \dfrac{R_n}{b}$ — нагрузка на единицу длины линии контакта вдоль образующей; $D_1 + D_2$ — диаметры 1-ой и 2-ой гранул цементного клинкера; μ_1 и E_1, μ_2 и E_2 — коэффициенты Пуассона и модуль продольной упругости для гранул цементного клинкера.

Ширина полоски контакта

$$C = 2a = 1{,}6\sqrt{P \cdot \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2}\left[\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right]}. \qquad (19)$$

Закон распределения напряжений — эллиптический, т.е.

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_k^2}+\left(\frac{X}{a}\right)^2 = 1, \qquad (20)$$

откуда следует

$$\sigma_x = \sigma_k \cdot \sqrt{1-\left(\frac{X}{a}\right)^2}, \qquad (21)$$

выражая, как и упомянутые выше, $X = \chi \cdot a$ и подставляя это значение в рассматриваемый вывод, найдем

$$\sigma_x = \sigma_k\sqrt{1-\chi^2} = \sigma_k \cdot \sigma_{\chi u}. \qquad (22)$$

Частные значения $\sigma_{\chi u} = \dfrac{\sigma_x}{\sigma_k}$ в зависимости от $\chi = \dfrac{X}{a}$ даны в табл. 2, а кривая распределения напряжений по половинке площадки AB представлена на рис. 9. Если откладывать $\sigma_{\chi u} = 1$ (в точке $\chi = 0$) в масштабе χ, то кривая эллипса превращается в дугу окружности радиуса единицы.

Табл. 2. Частные значения $\sigma_{\chi u}$

Table 2. Private values $\sigma_{\chi u}$

χ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\sqrt{1-\chi^2}$	1,0	0,995	0,975	0,954	0,917	0,866	0,800	0,714	0,60	0,436	0,00

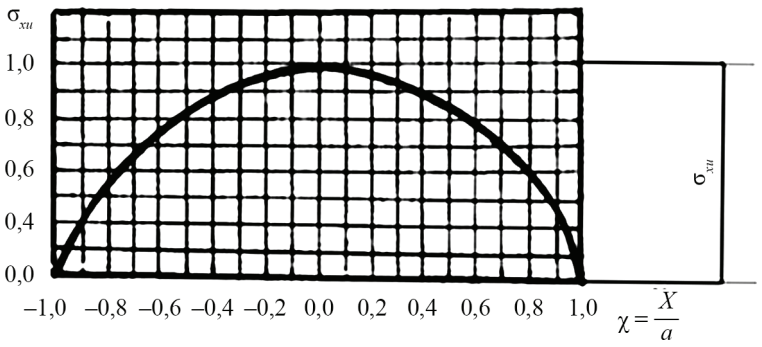


Рис. 9. Распределение напряжений на площадке контакта гранул цементного клинкера

Fig. 9. Stress distribution at the site of contact of cement clinker granules

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 13 Выпуск 11, 2018

Тогда нагрузка на площадку контакта может быть представлена в виде

$$P_n = 2\int_0^1 \sigma_k \cdot a \cdot \sqrt{1-\chi^2}\cdot d\chi = $$

$$= 2\sigma_k \cdot a\left(\frac{X}{2}\sqrt{1-\chi^2} + 0,5\text{arc}\sin\chi\right) \qquad (23)$$

или

$$P_n = 2\sigma_k \cdot a \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2}\cdot\sigma_k \cdot a. \qquad (24)$$

В интервале от 0 до χ

$$P_n = 2\int_0^{\chi} \sigma_k \cdot a \cdot \sqrt{1-\chi^2}\, d\chi = $$

$$= 2\sigma_k \cdot a \cdot \left(\frac{\chi}{2}\sqrt{1-\chi^2} + 0,5\text{arc}\sin\chi\right) =$$

$$= 2\sigma_k \cdot a \cdot f_{x1} \qquad (25)$$

и в интервале от χ до 1

$$P_{2m} = 2\sigma_k \cdot a \cdot f_{x2}, \qquad (26)$$

давая χ конкретные частные значения, найдем значения f_{x1} и f_{x2}, которые приведены в табл. 3.

Относительное смещение точки одной гранулы цементного клинкера относительно другой за цикл их контакта

В связи с появлением упругих деформаций в перекатывающихся соприкасающихся поверхностях гранул цементного клинкера, между ними по Рейнольдсу неизбежно возникает упругое относительное скольжение, причем по ширине полоски контакта возникают три характерные участка: два участка скольжения по краям, и один участок сцепления в средней части контакта [39].

В дифференциальном виде скорость относительного скольжения выражается величиной

$$V_{\text{отн}} = \frac{dS_{\text{отн}}}{dt} = \frac{dS_{\text{отн}}\cdot d\varphi}{d\varphi\cdot dt} = \omega_1 \cdot \frac{dS_{\text{отн}}}{d\varphi} = V_{\text{ксхи}}\cdot\omega_1 r_1, \qquad (27)$$

где $V_{\text{ксхи}} = \dfrac{V_{\text{отн}}}{\omega_1 \cdot r_1}$ — инвариант $V_{\text{отн}}$.

откуда определяется элементарное смещение точки поверхности одной гранулы цементного клинкера относительно другой

$$dS_{\text{отн}} = V_{\text{ксхи}} \cdot r_1 \cdot d\varphi. \qquad (28)$$

Полное смещение точки одной гранулы цементного клинкера по поверхности второй с момента начала до рассматриваемого цикла контакта, с учетом формулы (16), имеет вид φ

$$S_{\text{отн}} = r_1 \int_{-\varphi_m}^{\varphi} V_{\text{ксхи}} \cdot d\varphi = r_1 \int_{-\varphi_m}^{\varphi} \left[\delta - \left(0,5-\chi^2\right)\cdot q\right]\cdot d\varphi =$$

$$= r_1 \cdot \left[\left(\delta - 0,5\cdot q\right)\cdot\varphi + \left(\frac{r_1}{a}\right)\cdot q\left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4}\right)\right], \qquad (29)$$

где подставлены

$$\chi = \frac{X}{a} = \frac{r_1}{a}\cdot\sin\varphi,\ \varphi = \text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1}$$

и табличный интеграл

$$\int_{-\varphi_m}^{\varphi} \sin^2\varphi\cdot d\varphi = \left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4}\right).$$

Подставляя в (29) пределы интегрирования:

$$\varphi = \text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1};$$

$$\varphi_m = \text{arc}\sin\left(-\frac{a}{r_1}\right),$$

получим:

$$S_{\text{отн}} = r_1\left\{\left[\delta - 0,5\cdot q\cdot\left(\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1} + \text{arc}\sin\frac{a}{r_1}\right)\right] + \right.$$

$$+\left(\frac{r_1}{a}\right)^2\cdot\frac{q}{2}\left[\left(\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1} + \text{arc}\sin\frac{a}{r_1}\right) - \right.$$

$$\left.\left. -\frac{1}{2}\sin 2\left(\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1}\right) - \frac{1}{2}\sin 2\left(\text{arc}\sin\frac{a}{r_1}\right)\right]\right\}. \qquad (30)$$

Так как

$$\sin 2\left(\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1}\right) = 2\frac{a\cdot\chi}{r_1}\cdot\cos\left(\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1}\right) =$$

$$= 2\frac{a\cdot\chi}{r_1}\cdot\sqrt{1-\left(\frac{a\cdot\chi}{r_1}\right)^2},$$

и $$\sin 2\left(\text{arc}\sin\frac{a}{r_1}\right) = 2\frac{a}{r_1}\cdot\sqrt{1-\left(\frac{a}{r_1}\right)^2},$$

формула (30) приводится к виду

$$S_{\text{отн}} = r_1\cdot\xi_1 = r_1\cdot$$

$$\left\{\left[\left(\delta - 0,5q\right)\cdot\left(\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1} + \text{arc}\sin\frac{a}{r_1}\right)\right] + \right.$$

$$+\frac{r_1^2\cdot q}{2a^2}\left[\text{arc}\sin\frac{a\cdot\chi}{r_1} + \text{arc}\sin\frac{a}{r_1} - \right.$$

$$\left.\left. -\frac{a\cdot\chi}{r_1}\sqrt{1-\left(\frac{a\cdot\chi}{r_1}\right)^2} - \frac{a}{r_1}\sqrt{1-\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}\right]\right\}, \qquad (31)$$

Табл. 3. Значения f_{x1}, f_{x2} и $f_{x1} - f_{x2}$

Table 3. Value f_{x1}, f_{x2} and $f_{x1} - f_{x2}$

χ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
f_{x1}	0,0000	0,1048	0,1985	0,2961	0,3894	0,4785	0,5620	0,6399	0,7050	0,7562	0,7854
f_{x2}	0,7854	0,6807	0,5869	0,4893	0,3960	0,3069	0,2234	0,1455	0,0804	0,0292	0,00
$f_{x1} - f_{x2}$	–0,7854	–0,5859	–0,3884	–0,1932	–0,0066	+0,1716	+0,3386	+0,4944	+0,6246	+0,6246	+0,7854

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

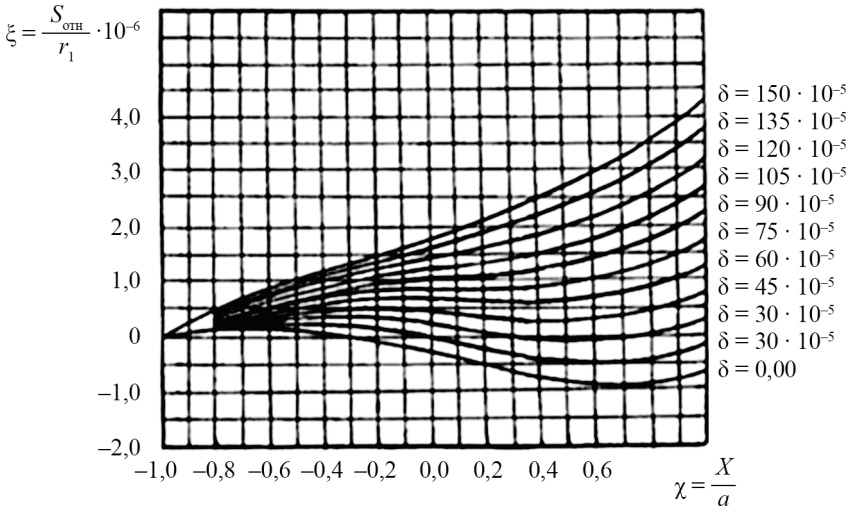


Рис. 10. Безразмерный коэффициент полного смещения за цикл контакта гранул цементного клинкера

Fig. 10. Dimensionless full displacement coefficient for the cycle of contact of cement clinker granules

где ξ_1 — безразмерный коэффициент смещения точки одной гранулы цементного клинкера относительного другой гранулы за цикл контакта.

Тогда смещение одной гранулы цементного клинкера по поверхности второй за цикл контакта имеет вид:

$$S_{отн} = \xi_2 \cdot r_1 = 2\left[\left(\delta - 0{,}5 \cdot q\right)\arcsin\frac{a}{r_1} + \frac{r_1^2 \cdot q}{2a^2}\left(\arcsin\frac{a}{r_1} - \frac{a}{r_1}\sqrt{1-\left(\frac{a}{r_1}\right)^2}\right)\right] \cdot r_1, \qquad (32)$$

где $\xi_2 = \frac{S_{отн}}{r_1}$ — безразмерный коэффициент смещения гранул цементного клинкера за цикл контакта (рис. 10).

Мощность, расходуемая на трение при упругом относительном скольжении, и работа трения в зоне контакта гранул цементного клинкера

Элементарная мощность, расходуемая на трение, при относительном скольжении гранулы цементного клинкера (рис. 11) определяется величиной:

$$N_x = 1 \cdot \mu_\varphi \cdot \sigma_к \cdot V_{отн} \cdot dx\,, \qquad (33)$$

где 1 — длина выделяемой полоски контакта, мм; μ_φ — коэффициент трения скольжения.

С учетом (21) и (27), получим:

$$N_x = 1 \cdot \mu_\varphi \cdot \sigma_к \cdot \omega_1 \cdot r_1 \cdot V_{кс хи} \cdot \sigma_{хи} \cdot dx. \qquad (34)$$

Работа сил трения упругого скольжения:

$$dA = N_x \cdot dt.$$

Подставляя $r_1 \cdot d\varphi = dx$ и $dx = a \cdot d\chi$ после соответствующих преобразований, найдем:

$$A_\sum = 2 \cdot \mu_\varphi \cdot \sigma_к \cdot a \cdot \int_0^1 \left(\int_0^{\varphi_m} r_1 \cdot d\varphi\right) \cdot \sigma_{хи} \cdot V_{кс хи} \cdot d\chi. \qquad (35)$$

Заменяя в этой формуле $\sigma_{хи}$ и $V_{кс хи}$ величинами по формулам (21) и (22), найдем:

$$A_\sum = 2\mu_\varphi \cdot \sigma_к \cdot a^2 \cdot \int_0^1 \left\{\sqrt{1-\chi^2}\left[\delta - \left(0{,}5 - \chi^2\right) \cdot q\right]\right\} \cdot d\chi. \qquad (36)$$

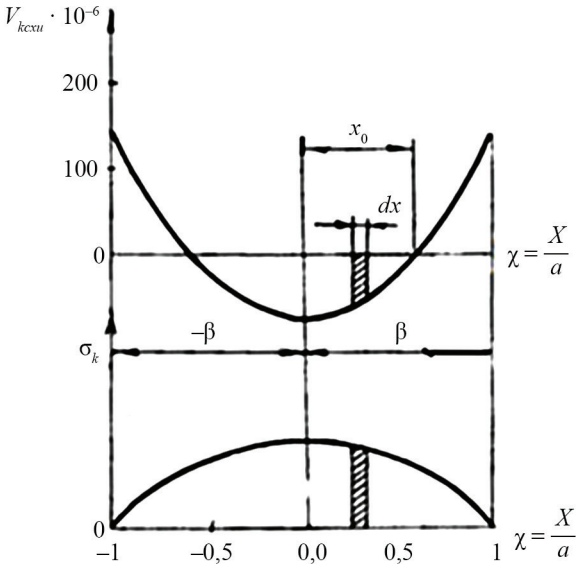


Рис. 11. Элементарная мощность, расходуемая на трение при относительном скольжении гранулы цементного клинкера

Fig. 11. Elementary power spent on friction with relative slip of cement clinker granules

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 13 Выпуск 11, 2018

За полный цикл контакта гранул цементного клинкера суммарная работа трения, с учетом смены знака $V_{ксхи}$ в фазе $\chi_0 = \frac{X_0}{a}$, оценивается величиной

$$A_{\sum} = 2 \cdot \sigma_к \cdot \mu_\varphi \cdot a^2 \cdot \alpha_A, \qquad (37)$$

где

$$\alpha_A = \int_{X_0}^{1} \sqrt{1-\chi^2}\left[\delta - \left(0,5-\chi^2\right)\cdot q\right]\cdot d\chi - \int_{0}^{X_0} \sqrt{1-\chi^2}\left[\delta - \left(0,5-\chi^2\right)\cdot q\right]\cdot d\chi$$

— инвариант работы трения.

Произведя интегрирование соответствующих элементарных преобразований полученного результата, находим:

$$\alpha_A = \left[\delta - 0,5\cdot q\right]\cdot\left[\frac{\pi}{4} - 2\left(\frac{\chi_0}{2}\cdot\sqrt{1-\chi_0^2} + 0,5\arcsin\chi_0\right)\right] + q\cdot\left\{\frac{\pi}{2} - 2\left[-\frac{\chi_0}{4}\cdot\sqrt{\left(1-\chi_0^2\right)^3} + \frac{1}{8}\left(\chi_0\sqrt{1-\chi_0^2} + \arcsin\chi_0\right)\right]\right\}. \qquad (38)$$

При предельном значении $\chi_0 = 0$ инвариант α_A приобретает вид:

$$\alpha_A = \left(\delta - 0,5\cdot q\right)\frac{\pi}{4} + \frac{q\cdot\pi}{2} = \frac{\pi}{4}\cdot\delta + \frac{3\cdot\pi}{8}\cdot q. \qquad (39)$$

Из совместного решения уравнений, связующих полуширину полоски контакта и контактного напряжения при сжатии гранул цементного клинкера:

$$a = 0,8\sqrt{\frac{R_n}{b}\cdot E_{пр}\cdot\left(\frac{2}{D_1} + \frac{2}{D_2}\cdot F\right)} \qquad (40)$$

и

$$\sigma_к = 0,418\cdot\sqrt{\frac{R_n}{b}\cdot E_{пр}\cdot\left(\frac{2}{D_1} + \frac{2}{D_2}\right)}, \qquad (41)$$

получим

$$a = a_0\cdot\sigma_к, \qquad (42)$$

где

$$a_0 = 1,36\frac{D_1\cdot D_2}{D_1 + D_2}\sqrt{\frac{F}{E_{пр}}} \qquad (43)$$

$$F = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$$

зависит от контактирующих материалов гранул цементного клинкера (E_1, E_2, μ_1, μ_2);

$$E_{пр} = \frac{2E_1\cdot E_2}{E_1 + E_2}.$$

Для конкретного случая материал гранул цементного клинкера, например a_0 = 4,34 · 10^{-6} (мм^3 · кг$^{-1}$).

Таким образом:

$$a = 4,34\cdot 10^6\cdot\sigma_к.$$

Графическая зависимость полуширины площадки контакта a от величины контактных напряжений приведена на рис. 12.

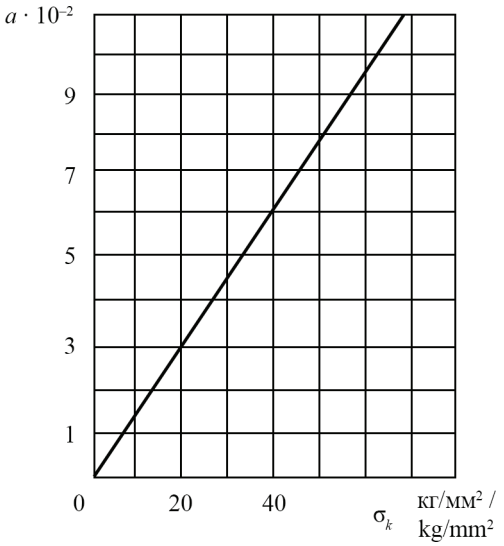


Рис. 12. Зависимость a от $\sigma_к$

Fig. 12. Dependence a on $\sigma_к$

Значения параметров q определяются из формулы (17).

Вводя в $\left(\frac{B}{r_1}\right)^2$ выражение (42) получим:

$$\left(\frac{a}{r_1}\right)^2 = \left(\frac{2\cdot a}{D_1}\right)^2 = F_0\cdot\sigma_к^2, \qquad (44)$$

где

$$F = \frac{7,3258\cdot i_{21}^2\cdot F}{\left(i_{21}+1\right)^2\cdot E_{пр}}.$$

Следовательно, величина с учетом (44) примет вид:

$$q = F_0\cdot\sigma_к^2\left(\frac{i_{21}^2+1}{i_{21}^2}\right) = F_0^1\cdot\sigma_к^2, \qquad (45)$$

где

$$F_0^1 = \frac{7,3258\cdot\left(i_{21}^2+1\right)}{E_{пр}\cdot\left(i_{21}+1\right)^2}, \qquad (46)$$

и конкретного случая исследования:

$$q = 3,6726\cdot 10^{-12}\sigma_к^2.$$

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

Графическая зависимость q от $\sigma_к$ приведена на рис. 13.

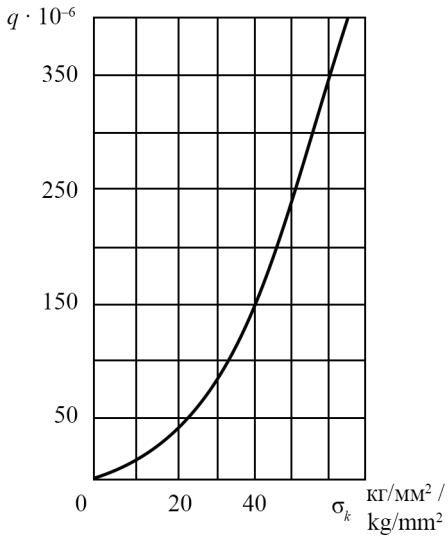


Рис. 13. Зависимость q от $\sigma_к$

Fig. 13. Dependence q from $\sigma_к$

Результаты аналитического исследования зависимости инварианта работы трения α_A от величины δ и q для конкретного материала и размеров гранул цементного клинкера приведены на рис. 14.

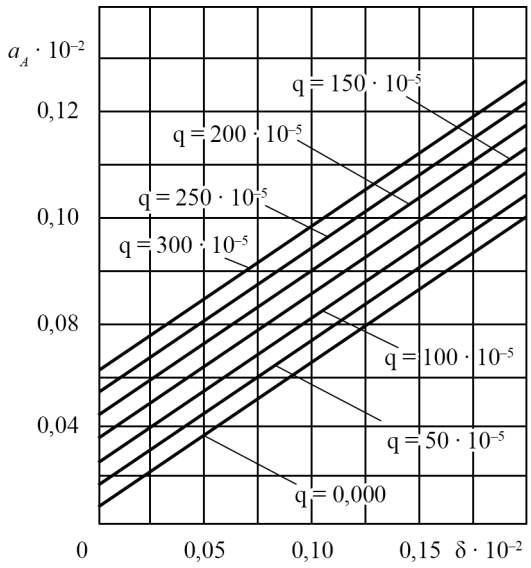


Рис. 14. Зависимость α_A от коэффициентов δ и q

Fig. 14. The dependence of α_A from the coefficients δ and q

Определение скорости продольного перемещения гранул цементного клинкера во вращающихся печах — первый вариант

При приготовлении цементного клинкера, полагая, что скорость продольного перемещения гранул цементного клинкера пропорциональна работе сил трения при упругом скольжении, с учетом углового параметра винтовых линий по внутреннему периметру винтового корпуса вращающейся печи, запишем зависимость:

$$V = G \cdot C_1 \cdot A_\Sigma, \qquad (47)$$

где G — постоянная, которая выражается в печи в виде зависимости $G = r \cdot \mathrm{tg}j$; A_Σ — сумма работы сил трения, сопровождающая упругое скольжение в зоне контакта гранул; C_1 — постоянная, которая выражает характеристики технологического процесса смешивания гранул цементного клинкера, например: коэффициент заполнения винтового корпуса вращающейся печи $К_у$; угол наклона оси вращения винтового корпуса вращающейся печи θ; угол наклона (конусность) стенок винтового корпуса вращения печи; соотношение винтовых канавок (винтовых линий) основного и противоположного направления $К_{о.п.к}$.

Введем в формулу (47) выражение (37) и величину $G = r \cdot \mathrm{tg}j$, запишем:

$$V = 2 \cdot C_1 \cdot \sigma_к \cdot \mu_\varphi \cdot a2 \cdot \alpha A \cdot r \cdot \mathrm{tg}j. \qquad (48)$$

Так как $d = 2r$ получим уравнение для определения продольной скорости перемещения гранул цементного клинкера в винтовом корпусе вращающейся печи:

$$V = C_1 \cdot d \cdot \mathrm{tg}j \cdot \sigma_к \cdot \mu_\varphi \cdot a_2 \cdot \alpha_A, \qquad (49)$$

где $d = 2r$; r — радиус сферы вписанной внутри винтового корпуса вращающейся печи. В целях изучения качественной стороны процесса движения гранул цементного клинкера принимаем $r = r_{сф} =$ = const; j — угол наклона образующей винтовой линии относительно оси вращения винтового корпуса вращающейся печи j = const; $\sigma_к$ — контактные напряжения, определяемые по формуле

$$\sigma_к = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{R_n}{b} \cdot E_{пр} \cdot \left(\frac{2}{D_1} + \frac{2}{D_2}\right)},$$

где μ_φ — коэффициент трения скольжения; a — полуширина полоски контакта компонентов гранул цементного клинкера определяемая по формуле

$$a = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{R_n}{b} \cdot E_{пр} \cdot \left(\frac{2}{D_1} + \frac{2}{D_2} \cdot F\right)};$$

α_A — инвариант работы трения;

$\alpha_A = \frac{\pi}{4} \cdot \delta + \frac{3\pi}{8} \cdot q + \frac{3\pi}{8} \cdot q = \frac{\pi}{4} \cdot (\delta + 1,5q)$ — интегральный безразмерный фактор, определяемый анализом кинематики упругого скольжения, причем δ = = 1 – θ — коэффициент относительного скольжения;

$q = \left(\frac{a}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{a}{r_2}\right)^2$ — безразмерный геометрический параметр; F — коэффициент, определяемый физи-

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 13 Выпуск 11, 2018

ческими свойствами контактирующих материалов гранул цементного клинкера (E_1; E_2; μ_1; μ_2), при этом

$$F = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_1}$$

зависит от контактирующих материалов гранул цементного клинкера (E_1, E_2, μ_1, μ_2); E_1, E_2 — модули упругости материалов гранул цементного клинкера; μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона материалов гранул цементного клинкера; D_1, D_2 — диаметры гранул цементного клинкера.

Определение скорости продольного перемещения гранул цементного клинкера во вращающихся печах — второй вариант

В результате аналитических и экспериментальных исследований в роторно-винтовых системах для приготовления цементного клинкера выявлены признаки, которые характеризуют их конструктивные особенности. Это позволило определить зависимости для вычисления продольной скорости перемещения гранул цементного клинкера во вращающихся печах:

$$V_n = A_0 \cdot \left(\omega_4 + B_1 \cdot \omega_3 + B_2 \cdot \omega_2 \cdot B_3 \cdot \omega + B_4\right), \quad (50)$$

где A_0 — коэффициент, зависящий от условий работы винтового корпуса вращающейся печи $A_0 = f(\kappa_v, m_1, m_2)$; K_V — коэффициент заполнения винтового корпуса вращающейся печи $\left(K_V = V_m / V_{\text{р.к.}}\right)$; ω — угловая скорость вращения винтового корпуса вращающейся печи; $V_{\text{р.к}}$ — объем внутренней полости винтового корпуса вращающейся печи; V_m — объем загрузки гранул цементного клинкера; m_1, m_2 — масса цементной сырьевой массы; B_1, B_2, B_3, B_4 — коэффициенты, которые характеризуют конструктивные особенности винтового корпуса вращающейся печи.

Так как вычисление коэффициентов A_0, B_1, B_2, B_3 — задача достаточно сложная, предлагается зависимость в виде полинома 2-й степени:

$$V_n = A_0 \cdot (B_1 \cdot \omega_2 + B_2 \cdot \omega + B_3), \quad (51)$$

где $A_0 = f(\kappa_v, m_1, m_2)$; B_1, B_2, B_3 — коэффициенты, характеризующие конструктивные особенности винтового корпуса вращающейся печи.

Сравнение результатов, рассчитанных по формулам (50) и (51) и экспериментально на моделях, показывает их хорошую сходимость.

Создание классификации вращающихся печей на базе предлагаемых роторно-винтовых систем

В результате выполненной работы разработана новая классификация роторно-винтовых систем для производства цементного клинкера (рис. 19), в которой представлены их конструктивные особенности.

Новизна конструкций печей для производства цементного клинкера подтверждена экспертами патентного ведомства РФ (Федеральной службой по

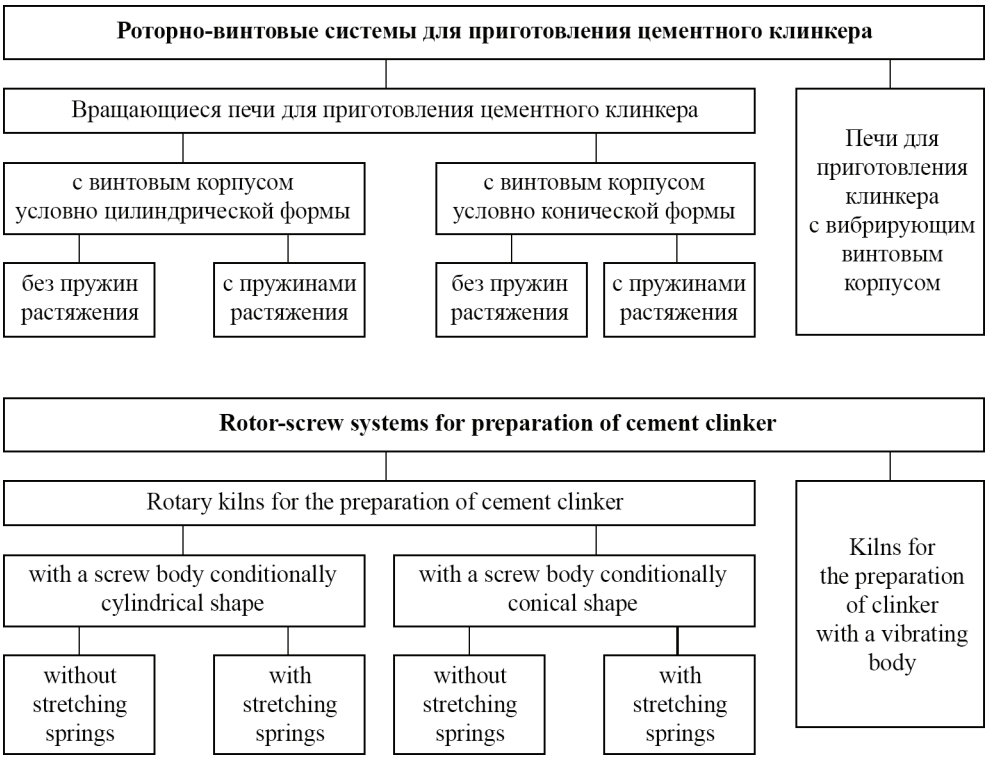


Рис. 15. Классификация роторно-винтовых систем для приготовления клинкера цемента

Fig. 15. Classification of rotary-screw systems for the preparation of cement clinker

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам) и полученными патентами на изобретения:

- вращающиеся печи для приготовления цементного клинкера с винтовым корпусом условно цилиндрической формы без пружин растяжения [18, 19, 21, 23, 25–27, 32];
- вращающиеся печи для приготовления цементного клинкера с винтовым корпусом условно цилиндрической формы с пружинами растяжения [20, 34];
- вращающиеся печи для приготовления цементного клинкера с винтовым корпусом условно конической формы без пружин растяжения [24, 28, 29, 31];
- вращающиеся печи для приготовления цементного клинкера с винтовым корпусом условно бочковой формы без пружин растяжения [22, 33];
- печи для приготовления клинкера с вибрирующим корпусом [30].

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты исследования в области приготовления клинкера цемента с использованием роторно-винтовых систем. Предложенные конструкции винтовых корпусов вращающихся печей, в сравнении с известными конструкциями аналогичного назначения, существенно повышают производительность, сокращают габариты, массу вращающихся печей и энергозатраты.

2. В результате аналитического исследования физических явлений, происходящих в зоне контакта гранул цементного клинкера с помощью аппарата безразмерных кинематических функций (инвариантов подобия) и анализа размерностей изучен не один какой-либо случай, а бесчисленное множество различных случаев, объединенных некоторой общностью свойств.

3. Предложены технические решения, защищенные 17 патентами РФ (прилагаются в списке литературы).

4. Использование предлагаемых технологий и конструкций повышает скорость вращения винтового корпуса печей, что увеличивает в несколько раз производительность и сокращает габариты.

За счет применения роторно-винтовых систем для приготовления цементного клинкера в десятки раз увеличивается скорость вращения винтового корпуса вращающихся печей, повышается производительность и уменьшаются габариты вращающихся печей.

5. Первичный анализ показал, что с учетом технологических решений винтового корпуса вращающейся печи, рекомендуется выполнять процесс с центрами кривизны внутрь винтового корпуса вращающейся печи.

6. Предложена зависимость для определения скорости перемещения гранул цементного клинкера в винтовом корпусе вращающейся печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mokoena T.F., Madyira M.D., Babarinde T.O., Akinlabi S.A.* Thermal investigation of an indirectly heated rotary kiln // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 413. P. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/413/1/012071

2. *Yin Qian, Qun Chen, Wen-Jing Du, Xing-Lin Ji, Lin Cheng.* Design requirements and performance optimization of waste heat recovery systems for rotary kilns // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 93. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.078

3. *Vijayan S.N., Sendhilkumar S.* Industrial applications of rotary kiln in various sectors — a review // International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014. Vol. 3. Issue 3. Pp. 342–345.

4. *Титов О.В.* Математическое моделирование обжига известково-нефелиновой и цементной шихты в трубчатых вращающихся // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 246–250.

5. *Соломина В.К.* Модель процесса обжига клинкера // Вестник ИрГТУ. 2011. № 10 (57). С. 18–23.

6. *Шмырин А.М., Седых И.А., Щербаков А.П., Ярцев А.Г., Аникеев Е.С.* Параметрическое окрестностное моделирование печи обжига клинкера // Вестник Тамбовского университета. Сер. : Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 3. С. 927–930.

7. *Теляшев Э.Г., Хайрудинов И.Р., Жирнов Б.С., Арпишкин И.М., Арпишкин М.И.* Пульсирующий режим во вращающихся печах // НефтеГазоХимия. 2016. № 2. С. 47–52.

8. *Шоломицкий А.А., Ковалев П.С., Медведская Т.М., Мартынов А.В.* Влияние нагрева печи на прямолинейность ее оси вращения // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22. № 4. С. 18–26.

9. *Комар А.Г.* Строительные материалы и изделия. М. : Высшая школа, 1988. С. 147–148.

10. *Таратута В.Д., Белокур К.А., Серга Г.В.* Роторно-винтовые системы в области производства цемента // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 115 (01). С. 1023–1038. URL: http://ej.kubagro.ru/2016/01/pdf/64.pdf

11. *Таратута В.Д., Серга Г.В.* Применение ударно-волновых винтовых систем в строительной отрасли // Механика ударно-волновых процессов в

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018 Volume 13 Issue 11, 2018

технологических системах : сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф., г. Ростов-на-Дону 9–12 октября 2012. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2012. С. 214–231.

12. *Серга Г.В., Таратута В.Д.* Инновационная технология получения клинкера для производства цемента с использованием технологии и оборудования ударно-волновых процессов // Вопросы вибрационной технологии : межвуз. сб. науч. ст. ДГТУ. Ростов-на-Дону, 2012. С. 134–211.

13. *Таратута В.Д., Серга В.Д.* Инновационные технологии с большой амплитудой движения масс загрузки в производстве растворов и бетонных смесей // Инновации в машиностроении : сб. тр. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет, 2011. С. 196–201.

14. *Серга Г.В., Белокур К.А., Иванов А.Н.* Вибрационные технологии с большой амплитудой движения масс загрузки // Вибрации в технике и технологиях. 2010. № 4 (60). С. 49–65.

15. *Белокур К.А., Таратута В.Д., Серга Г.В.* Роторно-винтовые технологические системы для приготовления растворов и бетона // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118 (04). С. 794–804. URL: http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/46.pdf

16. *Луценко Е.В., Серга Г.В.* Теория информации и когнитивные технологии в моделировании сложных многопараметрических динамических технических систем // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 121 (07). С. 68–115. URL: http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/02.pdf

17. *Луценко Е.В., Серга Г.В.* Применение теории информации в моделировании сложных многопараметрических динамичных систем для финишной и виброволновой обработки деталей машин // Перспективные направления развития финишных методов обработки прецизионных поверхностей деталей наукоемких изделий; виброволновые технологии : Междунар. науч. симпоз. технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону, 2016. С. 83–89.

18. Пат. РФ 2421669, МПК F27B 7/14. Вращающаяся печь для обжига цементного клинкера / К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2009132730/0231.08.2009; опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.

19. Пат. РФ 2421670, МПК F27B 7/14. Вращающаяся печь для обжига сыпучего материала для получения цементного клинкера / К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2009133068/02 02.09.2009; опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.

20. Пат. РФ 2421671, МПК F27B 7/14. Печь для обжига цемента / К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2009140639/02 02.11.2009; опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.

21. Пат. РФ 2424482, МПК F27B 7/14. Вращающаяся печь для приготовления цементного клинкера (варианты) / К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2009133021/02 02.09.2009; опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20.

22. Пат. РФ 2447130, МПК C10B 39/00 F27B 7/14. Устройство для охлаждения клинкера / В.Д. Таратута, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2010145398/05 08.11.2010; опубл. 10.04.2012. Бюл. № 10.

23. Пат. РФ 2456520, МПК F27B 7/16. Вращающаяся печь для приготовления цементного клинкера (варианты) / В.Д. Таратута, К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2009126872/03 13.07.2009; опубл. 20.01.2011. Бюл. № 20.

24. Пат. РФ 2469250, МПК F27B 7/16. Вращающаяся печь для приготовления цементного клинкера / Г.В. Серга, В.Д. Таратута; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2011117939/00 04.05.2011; опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.

25. Пат. РФ 2476793, МПК F27B 7/14. Печь вращающаяся для приготовления цементного клинкера / В.Д. Таратута, К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2011106741/02 22.02.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.

26. Пат. РФ 2476794, МПК F27B 7/16. Вращающаяся печь для обжига шлама для приготовления цементного клинкера / В.Д. Таратута, К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 201107329/02 25.02.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.

27. Пат. РФ 2476795, МПК F27B 7/16. Печь вращающаяся для обжига шлама для приготовления цементного клинкера / Г.В. Серга, В.Д. Таратута; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2011117928/02 04.05.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.

28. Пат. РФ 2476796, МПК F27B 7/16. Вращающаяся печь для обжига шлама для приготовления цементного клинкера / Г.В. Серга, В.Д. Таратута; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2011117941/02 04.05.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.

29. Пат. РФ 2479810, МПК F27B 7/16. Вращающаяся печь для обжига клинкера / В.Д. Таратута, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2011123070/02 07.06.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.

30. Пат. РФ 2483260, МПК F27B 7/14. Печь для обжига цемента (варианты) / К.А. Белокур, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государствен-

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

ный аграрный университет. Заявл. № 2009143193/03 23.11.2009; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 15.

31. Пат. РФ 2533292, МПК F27B 7/16. Печь для приготовления цементного клинкера / В.Д. Таратута, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2013120415/02 30.04.2013; опубл. 20.11.2014. Бюл. № 32.

32. Пат. РФ 2536318, МПК F27B 7/16. Печь вращающаяся для приготовления цементного клинкера / Г.В. Серга, В.Д. Таратута; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2013120422/02 30.04.2013; опубл. 20.12.2014. Бюл. № 35.

33. Пат. РФ 2561571, МПК F27B 7/14. Вращающаяся печь для обжига шлама для приготовления цементного клинкера / В.Д. Таратута, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2014114567/02 11.04.2014; опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

34. Пат. РФ 2583215, МПК F27B 7/14. Печь для обжига цемента / В.Д. Таратута, Г.В. Серга; патентообл. Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. № 2014144250/02 31.10.2014; опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.

35. *Горячкин В.П.* Принцип подобия и однородности. М. : Колос, 1965. Т. 1. 395 с.

36. *Кирпичев М.В.* Теория подобия. М. : Изд-во АН СССР. 1953. 96 с.

37. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд. М. : Наука, 1977. 440 с.

38. Машиностроение. Энциклопедический справочник. М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1947. Т. 1. С. 358.

39. Машиностроение. Энциклопедический справочник. М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1947. Т. 2. С. 134.

Поступила в редакцию 14 сентября 2018 г.
Принята в доработанном виде 2 октября 2018 г.
Одобрена для публикации 30 октября 2018 г.

Об авторах: **Серга Георгий Васильевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики, **Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (Кубанский ГАУ),** 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13, serga-georgy@mail.ru;

Белокур Кирилл Алексеевич — кандидат технических наук, доцент, декан землеустроительного факультета, **Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (Кубанский ГАУ),** 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13, kirillbelokur@yandex.ru;

Хвостик Эдуард Андреевич — магистрант архитектурно-строительного факультета, **Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина (Кубанский ГАУ),** 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13, e.a.hvostik@gmail.com.

REFERENCES

1. Mokoena T.F., Madyira M.D., Babarinde T.O., Akinlabi S.A. Thermal investigation of an indirectly heated rotary kiln. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 413:012071. DOI: 10.1088/1757-899X/413/1/012071

2. Yin Qian, Qun Chen, Wen-Jing Du, Xing-Lin Ji, Lin Cheng. Design requirements and performance optimization of waste heat recovery systems for rotary kilns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 93:1-8. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.078

3. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial applications of rotary kiln in various sectors-a review. *International Journal of Engineering Innovation & Research.* 2014; 3(3):342-345.

4. Titov O.V. Mathematical modeling of roasting of calcnepheline and cement mixture in tubular rotary kilns. *Proceedings of the Mining Institute.* 2013; 202:246-250. (rus.).

5. Solomina V.K. Model of clinker burning. *National Research Irkutsk State Technical University*. 2011; 10(57):18-23. (rus.).

6. Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Shcherbakov A.P., Yartsev A.G., Anikeev E.S. Parametric neighborhood modeling of clinker kiln. *Bulletin of Tambov University. Ser. : Natural and technical Sciences.* 2014; 19(3):927-930. (rus.).

7. Telyashev E.G., Khairudinov I.R., Jirnov B.S., Arpishkin I.M., Arpishkin M.I. A pulsating mode in the rotary kilns. *Oil and Gas Chemistry*. 2016; 2:47-52. (rus.).

8. Sholomitsky A.A., Kovalev P.S., Medvedskaya T.M., Martynov A.V. Effect of temperature on the straightness of the axis of the rotary kiln. *Bulletin of Siberian state University of geosystems and technologies.* 2017; 22(4):18-26. (rus.).

9. Komar A.G. [*Building materials and products*]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988; 147-148. (rus.).

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 13 Выпуск 11, 2018
Volume 13 Issue 11, 2018

10. Taratuta V.D., Belokur K.A., Serga G.V. Rotary screw systems in cement. *Scientific journal of Kuban state agrarian University*. 2016; 115(01):1023-1038. URL: http://ej.kubagro.ru/2016/01/pdf/64.pdf (rus.).

11. Taratuta V.D., Serga G.V. Use of shock-wave helical systems in the construction industry. *Mechanics of shock-wave processes in technological systems : collection of scientific works International. scientifically.- techn. conf., Rostov-on-Don, October 9–12, 2012. Rostov-on-Don, DGTU*, 2012; 214-231. (rus.).

12. Serga G.V., Taratuta V.D. [Innovative technology of clinker production for cement production using technology and equipment of shock-wave processes]. *Questions vibration technology : interuniversity collection. collector. scientific. articles. Rostov-on-Don*. 2012; 134-211. (rus.).

13. Taratuta V.D., Serga G.V. [Innovative technology with large amplitude motion of the mass loading in the manufacture of mortars and concrete mixes]. *Innovation in engineering : sat. Tr. mate. Second between. scientifically.- prakt. conf. Kemerovo, Kuzbass State technical University Publ.,* 2011; 196-201. (rus.).

14. Serga G.V., Belokur K.A., Ivanov A.N. Vibration technology with a large amplitude movement of the masses download. *Vibrations in engineering and technology*. 2010; 4(60):49-65. (rus.).

15. Belokur K.A., Taratuta V.D., Serga G.V. Rotor and screw technological systems for preparation of solutions and concrete. *Scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016; 118(04):794-804. URL: http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/4(rus.).6.pdf

16. Lutsenko E.V., Serga G.V. The information theory and cognitive technologies in modeling complex multivariable dynamic technical systems. *Scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016; 121(07):68-115.URL: http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/02.pdf (rus.).

17. Lutsenko E.V., Serga G.V. Application of information theory in the modeling of complex multiparameter dynamic systems for finishing and vibration wave processing of machine parts. *Perspective directions of development of methods of finishing processing of precision surfaces of high-tech products; webrevolve technology : Intern. scientific the international Symposium technologists-machine builders. Rostov-on-Don,* 2016; 83-89. (rus.).

18. Pat. Russian Federation 2421669, MPK F27B 7/14. [*Rotary kiln for cement clinker firing*] / K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2009132730/02 31.08.2009; publ. 20.06.2011. Bul. No. 17. (rus.).

19. Pat. Russian Federation 2421670, MPK F27B 7/14. [*Rotary kiln for firing bulk material to produce cement clinker*] / K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2009133068/02 02.09.2009; publ. 20.06.2011. Bul No. 17. (rus.).

20. Pat. Russian Federation 2421671. MPK F27B 7/14. [*Cement kiln*] / K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2009140639/02 02.11.2009; publ. 20.06.2011. Bul. No. 17. (rus.).

21. Pat. Russian Federation 2424482. MPK F27B 7/14. [*Rotary kiln for cement clinker preparation (options)*] / K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2009133021/02 02.09.2009; publ. 20.07.2011. Bul. No. 20. (rus.).

22. Pat. Russian Federation 2447130. MPK C10B 39/00 F27B 7/14. [*Clinker cooling device*] / V.D. Taratuta, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2010145398/05 08.11.2010; publ. 10.04.2012. Bul. No. 10. (rus.).

23. Pat. Russian Federation 2456520. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for cement clinker preparation (options)*] / V.D. Taratuta, K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2009126872/03 13.07.2009; publ. 20.01.2011. Bul. No. 20. (rus.).

24. Pat. Russian Federation 2469250. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for cement clinker preparation*] / G.V. Serga, V.D. Taratuta; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. № 2011117939/00 04.05.2011; publ. 10.12.2012. Bul. № 34. (rus.).

25. Pat. Russian Federation 2476793. MPK F27B 7/14. [*Rotary kiln for cement clinker preparation*] / V.D. Taratuta, K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2011106741/02 22.02.2011; publ. 27.02.2013. Bul. No. 6. (rus.).

26. Pat. Russian Federation 2476794. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for calcining sludge for making of cement clinker*] / V.D. Taratuta, K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 201107329/02 25.02.2011; publ. 27.02.2013. Bul. № 6. (rus.).

27. Pat. Russian Federation 2476795. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for calcining sludge for making of cement clinker*] / G.V. Serga, V.D. Taratuta; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. № 2011117928/02 04.05.2011; publ. 27.02.2013. Bul. No. 6. (rus.).

28. Pat. Russian Federation 2476796. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for calcining sludge for making of cement clinker*] / G.V. Serga, V.D. Taratuta; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2011117941/02 04.05.2011; publ. 27.02.2013. Bul. No. 6. (rus.).

29. Pat. Russian Federation 2479810. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for clinker firing*] / V.D. Taratuta, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2011123070/02 07.06.2011; publ. 20.04.2013. Bul. No. 11. (rus.).

30. Pat. Russian Federation 2483260. MPK F27B 7/14. [*Cement kiln (options)*] / K.A. Belokur, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl.

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 11, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018

No. 2009143193/03 23.11.2009; publ. 27.05.2013. Bul. No. 15. (rus.).

31. Pat. Russian Federation 2533292. MPK F27B 7/16. [*Furnace for preparation of cement clinker*] / V.D. Taratuta, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2013120415/02 30.04.2013; publ. 20.11.2014. Bul. No. 32. (rus.).

32. Pat. Russian Federation 2536318. MPK F27B 7/16. [*Rotary kiln for cement clinker preparation*] / G.V. Serga, V.D. Taratuta; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2013120422/02 30.04.2013; publ. 20.12.2014. Bul. No. 35. (rus.).

33. Pat. Russian Federation 2561571. MPK F27B 7/14. [*Rotary kiln for calcining sludge for making of cement clinker*] / V.D. Taratuta, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2014114567/02 11.04.2014; publ. 27.08.2015. Bul. No. 24. (rus.).

34. Pat. Russian Federation 2583215. MPK F27B 7/14. [*Cement kiln*] / V.D. Taratuta, G.V. Serga; patentee of Kuban State Agrarian University. Appl. No. 2014144250/02 31.10.2014; publ. 10.05.2016. Bul. No. 13. (rus.).

35. Goryachkin V.P. [*The principle of similarity and homogeneity*]. Collected works. Moscow, Kolos Publ., 1965; 1:395.

36. Kirpichev M.V. [*Similarity theory*]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1953; 96. (rus.).

37. Sedov L.I. [*Methods of similarity and dimension in mechanics*]. 8th ed. Moscow, Science Publ., 1977; 440. (rus.).

38. [*Engineering. Enciklopedicheskii directory*]. Handbook. Moscow, State scientific and technical publishing house of machine-building literature. 1947; 1:358. (rus.).

39. [*Engineering. Enciklopedicheskii directory*]. Handbook. Moscow, State scientific and technical publishing house of machine-building literature. 1947; 2:134. (rus.).

Received September 14, 2018
Adopted in a modified form on October 2, 2018
Approved for publication October 30, 2018

About the authors: **Georgi V. Serga** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, **Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Kuban SAU),** 13 Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation, serga-georgy@mail.ru;

Kirill A. Belokur — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Land Management, **Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Kuban SAU),** 13 Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation, kirillbelokur@yandex.ru;

Eduard A. Khvostik — Master student of the Faculty of Architecture and Construction, **Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin (Kuban SAU),** 13 Kalinina st., Krasnodar, 350044, Russian Federation, e.a.hvostik@gmail.com.

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 11, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 13 Выпуск 11, 2018