

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,  
к.ф.-м.н Русанова Н. И.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОТКОСА НА СЕГРЕГАЦИЮ МАТЕРИАЛОВ ПО КРУПНОСТИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

На основании экспериментальных данных сделана оценка влияния физических свойств материалов и условий формирования откоса (угла наклона образующей откоса, его протяжённости и высоты падения материалов на него). Приводится уравнение, описывающее влияние перечисленных факторов на показатель сегрегации.

**Ключевые слова:** сегрегация, обобщённые характеристики ситового состава, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков, условия формирования откоса, физические свойства материалов.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В технологических процессах, происходящих с участием неоднородных по крупности сыпучих материалов, при их движении по откосу развивается сегрегация частиц различной крупности. В результате, как известно, крупность материала от вершины откоса к его подножию увеличивается. В агломерационном и доменном производствах необходимо не только учитывать проявление сегрегации, но и влиять на степень её развития для достижения высоких технико-экономических показателей процессов. Для оценки степени развития сегрегации предложены различные показатели [1–3 и др.]. Большинство из них позволяют делать оценку развития сегрегации в конкретных условиях. И только предложенный в работе [3] показатель позволяет оценить сегрегацию с учётом ситового состава материалов во всём его многообразии. При этом он не позволяет прогнозировать развитие сегрегации с учётом вида материала при изменении условий формирования откоса, таких как высота падения материала на откос, его протяжённость и угол наклона образующей откоса. В результате управление сегрегацией на откосе в технологических процессах затруднено и прогнозирование её развития в изменённых условиях формирования откоса невозможно.

**Постановка задачи.** В связи с изложенным выше в данной работе поставлена задача на основании опытных данных провести оценку влияния на сегрегацию условий формирования откоса и предложить зависимости, позволяющие управлять степенью её развития.

**Изложение материала и его результаты.** В работе [3] степень развития сегрегации материалов предложено характеризовать коэффициентом  $Z$ , численное значение которого изменяется от 0 до 1 и вычисляется по формуле

$$Z = A \cdot \bar{d}_n \cdot e^{-B \cdot \bar{d}_n}, \quad (1)$$

где  $\bar{d}_n$  — средний размер кусков материала, мм;  $A$  и  $B$  — коэффициенты, отражающие влияние на сегрегацию свойств материала как сыпучего тела и условий формирования откоса.

При рассмотрении движения материала по откосу обычно полагают, что отдельные куски либо скатываются, либо скользят по поверхности. Однако такой подход к движению материалов по поверхности откоса не совсем корректен. Связано это с тем, что, во-первых, движение отдельных кусков происходит в потоке материала и их скатывание и скольжение по поверхности в чистом виде затруднено, а во-вторых, из-за различия скорости движения кусков разного

размера отдельные куски движутся хаотически как в продольном, так и в поперечном направлении потока. Поэтому на распределение материалов по крупности на откосе определяющее влияние должно оказывать не столько кинематическое трение (трение качения и скольжения), возникающее в месте контакта движущихся кусков с неподвижной поверхностью откоса, сколько внутреннее трение, препятствующее движению отдельных кусков относительно друг друга.

Из закона И. Ньютона коэффициент внутреннего трения равен

$$\mu = \frac{F_{mp}}{v} \cdot \frac{r}{S}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент внутреннего трения, Па·с;  $F_{mp}$  — сила внутреннего трения, Н;  $S$  — площадь соприкосновения, м<sup>2</sup>;  $r$  — расстояние между граничными плоскостями, м;  $v$  — относительная скорость граничных плоскостей среды, м/с. Для слоя сыпучих материалов площадь соприкосновения равна поверхности кусков и определяется по уравнению

$$S = S_0 \cdot (1 - \varepsilon), \quad (3)$$

где  $S_0$  — удельная поверхность кусков, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  — пористость слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Расстояние же между граничными плоскостями для слоя пропорционально эквивалентному диаметру каналов:

$$r = \bar{d}_э = \bar{d} \cdot \frac{4\varepsilon}{k(1 - \varepsilon)}, \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент формы.

С учётом значений (3) и (4) для слоя уравнение (2) для движения сыпучих материалов принимает вид

$$\mu = \frac{F}{v} \cdot \frac{4 \cdot \bar{d}}{k \cdot S_0} \cdot \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент внутреннего трения для слоя сыпучего материала, согласно уравнению (5), пропорционален отношению пористости слоя к квадрату объёма, занятого кусками материала в слое:

$$\mu \propto \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)^2} = M, \quad (6)$$

где  $M$  — безразмерный комплексный параметр, характеризующий материал как сыпучую среду.

Пористость слоя  $\varepsilon$  пропорциональна соотношению насыпной  $\gamma_{нас}$  и кажущейся  $\gamma_{каж}$  плотностей и в то же время пропорциональна тангенсу угла естественного откоса материалов  $tg \alpha$  (по опытным данным эта связь характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,97). Тогда безразмерный параметр  $M$  через основные физические характеристики может быть вычислен по выражению

$$M = \left( \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_{каж}} \right)^2 \cdot tg \alpha. \quad (7)$$

Безразмерный комплексный параметр  $M$  достаточно полно характеризует способность неоднородного сыпучего материала сегрегировать на откосе, и его величина оказывает влияние на коэффициент  $A$  уравнения (1). Как показал анализ опытных данных, коэффициент  $A$  и параметр  $M$  связаны линейно и их связь характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,997.

Изучение закономерностей влияния условий формирования откоса на сегрегацию материала проводили на установке и по методике, описанной в работе [3]. Исследования проводились с четырьмя материалами: агломерат, коксик, известняк и щебень. Основные физические характеристики этих материалов приведены в таблице.

Таблица

Физические характеристики исследованных материалов

Материалы	$\gamma_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\gamma_{каж}$ , кг/м <sup>3</sup>	$tg \alpha$	$\alpha$
Агломерат	1935	3858	0,70	35
Коксик	525	1000	0,78	38
Щебень	1313	2353	0,65	33
Известняк	1452	2469	0,63	32

Первоначально было исследовано влияние на развитие сегрегации угла наклона поверхности откоса к горизонту. Исследованию подвергались все четыре материала одинакового ситового состава, с одинаковыми обобщёнными характеристиками. Жёлобу при проведении исследований придавался угол наклона в 30, 35 и 40 градусов.

При углах наклона жёлоба 30 и 40 градусов наблюдалось соответственно нижнее и верхнее выклинивание материала. При нижнем выклинивании основная масса материала сосредотачивалась в верхней части жёлоба, а при верхнем — в нижней. Если при изучении влияния на сегрегацию исходного ситового состава агломерата масса материала во всех отсеках была примерно одинакова, то при выклинивании отношение масс материала в крайних зонах откоса было равно 3–5. Однако, как показала обработка полученных данных, и при выклинивании распределение материалов на откосе по крупности описывается установленными в работе [3] уравнениями. При этом ситовый состав материалов во всех отсеках подчинялся распределению Вейбулла.

Вместе с тем при прочих равных условиях степень развития сегрегации материала по крупности с увеличением угла наклона образующей откоса понижается, — показатель  $Z$  с увеличением угла откоса уменьшался во всех случаях (рис. 1).

Очевидно, такое изменение показателя сегрегации  $Z$  вызвано различным механизмом формирования слоя на откосе при нижнем и верхнем выклинивании материала.

Механизм формирования слоя на откосе при различных углах наклона жёлоба следующий.

В случае, когда угол наклона жёлоба меньше угла естественного откоса материалов ( $\beta=30^\circ$ ), их движение по жёлобу затруднено. При этом первые порции материала сосредотачиваются в месте его падения на жёлоб, образуя откос с углом наклона поверхности к горизонту, равным углу естественного откоса. В результате

последующие порции материала движутся уже не по поверхности жёлоба, а по поверхности материала. При этом создаются более благоприятные условия для развития сегрегации материала, и крупные куски сосредотачиваются в нижней части жёлоба. Согласно полученным данным, средняя крупность кусков материала у подножия откоса в 3–4 раза превышает его крупность в верхней части (рис. 2).

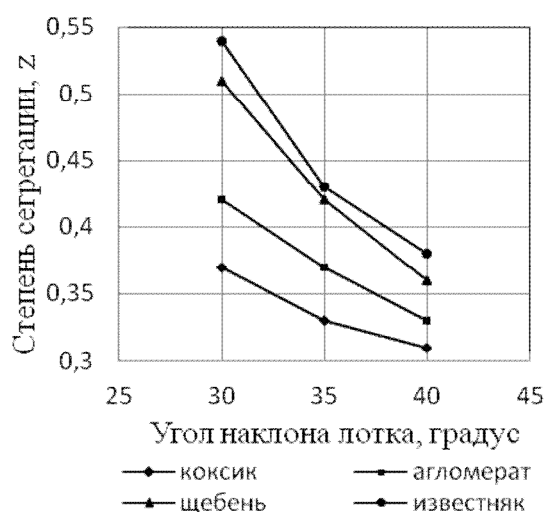


Рисунок 1 Зависимость показателя сегрегации от угла наклона жёлоба

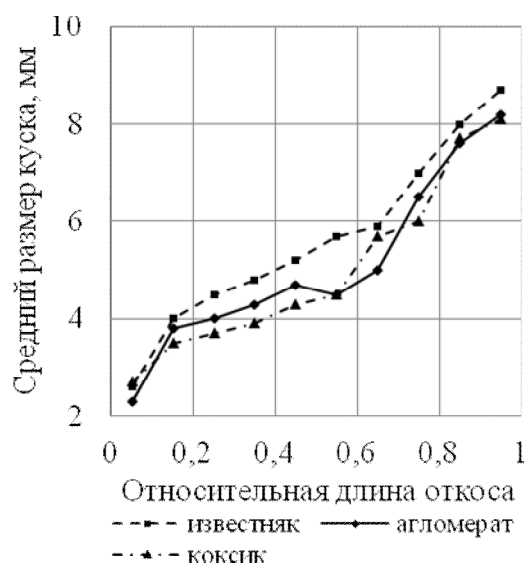


Рисунок 2 Изменение средней крупности материалов по длине откоса при нижнем выклинивании ( $\beta=30^\circ$ )

В случае, когда угол наклона жёлоба больше угла естественного откоса материалов ( $\beta=40^\circ$ ), весь материал первоначально сосредотачивается у подножия откоса и его средняя крупность только в 1,3–1,5 раза выше исходной средней крупности материала. Такое превышение средней крупности кусков у подножия откоса вызвано некоторым развитием сегрегации в объёме первых порций материала, ссыпавшихся на жёлоб и частично сегрегацией крупных кусков при загрузке последующих порций материала. В целом по откосу крупность материалов при угле наклона жёлоба  $40^\circ$  распределена более равномерно, — средняя крупность материала у подножия откоса только в 2,5–2,8 раза выше, чем на его вершине (рис. 3).

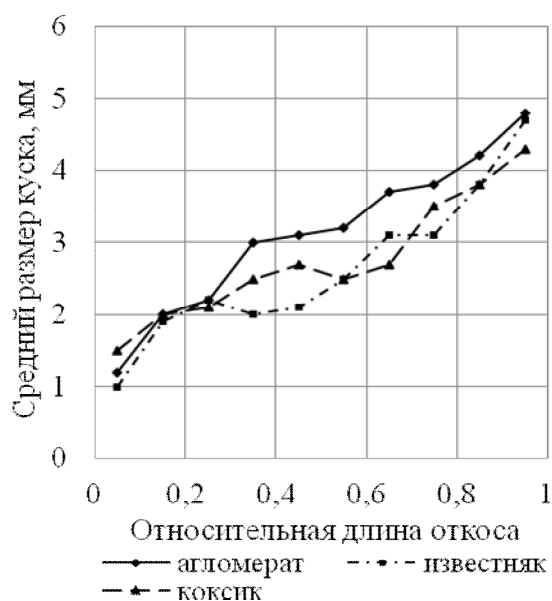


Рисунок 3 Изменение средней крупности материалов по длине откоса при верхнем выклинивании ( $\beta=40^\circ$ )

Влияние на развитие сегрегации неоднородного сыпучего материала протяжённости откоса, его второй важной характеристики, установлено по результатам изучения сегрегации агломератов различного ситового состава при протяжённости откоса (жёлоба) 50, 75 и 100 см и угле наклона жёлоба к горизонту  $35^\circ$ .

По результатам экспериментов установлено, что распределение отдельных фракций агломерата по длине откоса при различной длине жёлоба для всех рассмотренных вариантов ситового состава исследованных агломератов качественно одинаковое. Содержание мелочи (фракции крупностью меньше 1,5 мм) от подножия к вершине откоса во всех случаях возрастало с 0,2–2,0 % до 20–40 %, а содержание крупных кусков (крупностью более 10 мм) снижалось с 9–35 % до 0,8–2,1 %. В средних зонах откоса наблюдалось повышенное содержание промежуточных фракций.

Обработка экспериментальных данных показала, что установленные в предыдущих разделах закономерности сегрегации неоднородного сыпучего материала по откосу сохраняются и при изменении его протяжённости: во всех отсеках ситовый состав материала, так же как и в предыдущих опытах, согласуется с распределением Вейбулла. Распределение обобщённых характеристик ситового состава (среднего размера кусков  $\bar{d}$  и коэффициента вариации их размера  $v$ ) по откосу в зависимости от его протяжённости для одного из агломератов представлено соответственно на рисунках 4 и 5. Как видно, при увеличении крупности материалов к подножию их однородность возрастает.

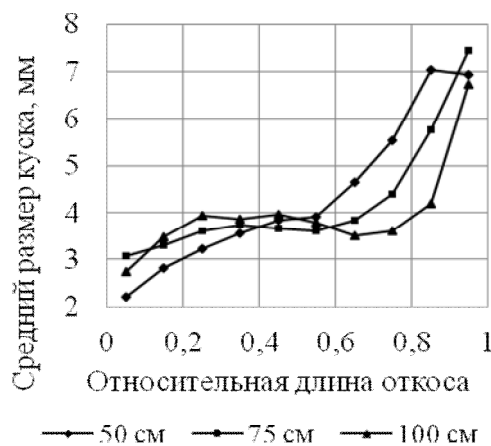


Рисунок 4 Изменение среднего размера кусков по длине откоса при разной его протяжённости

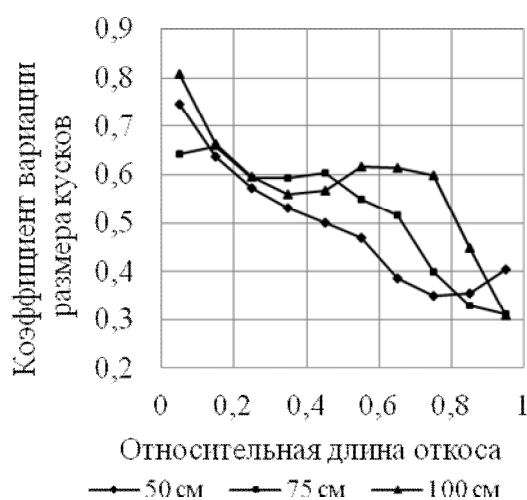


Рисунок 5 Изменение коэффициентов вариации размера кусков по длине откоса при разной его протяжённости

С увеличением длины жёлоба отношение средних размеров кусков в крайних зонах уменьшалось в 1,2–1,3 раза. Одновременно происходило и изменение отношения коэффициентов вариации размера кусков в этих же зонах: с увеличением длины жёлоба оно уменьшалось в 1,3–1,4 раза. При этом показатель развития сегрегации  $Z$  снижается.

Влияние на развитие сегрегации высоты падения материала на откос изучалось по распределению на откосе агломерата при длине жёлоба 50 см и угле его наклона к горизонту  $35^\circ$ . Высота падения агломерата на жёлоб в экспериментах изменялась от 6 см до 22 см с шагом 2 см.

При анализе экспериментальных данных установлено, что общие закономерности распределения материалов по крупности на откосе, изложенные выше, сохраняются и при изменении высоты падения потока. Однако с изменением высоты падения потока степень развития сегрегации материала изменяется.

Из сравнительного анализа полученных результатов следует, что при увеличении высоты падения материала на откос распределение отдельных фракций по его длине становится более равномерным. Если при высоте падения агломерата на от-

кос, равной 6 см, фракция крупностью менее 1,5 мм сосредоточена в верхней части откоса (33,4 % против 0,6 % у подножия), то при высоте падения материала 22 см наблюдается её значительное количество (около 5 %) и у подножия откоса. Крупные же фракции 5–10 и 10–15 мм при высоте падения агломерата 6 см сосредоточены у подножия откоса, — здесь их содержание почти в 8 раз выше, чем на вершине откоса. При увеличении высоты падения агломерата на откос до 22 см содержание крупных фракций у подножия снижается, а на вершине откоса возрастает. Содержание крупных фракций у подножия при этом только в 3,5 раза выше, чем на вершине откоса.

Перераспределение отдельных фракций по откосу, вызванное увеличением высоты падения материала на откос, приводит к изменению распределения по длине откоса обобщённых характеристик ситового состава агломерата. При небольшой ( $h=6$  см) высоте падения потока средняя крупность агломерата у подножия в 3,0 раза выше, чем на вершине откоса (рис. 6).

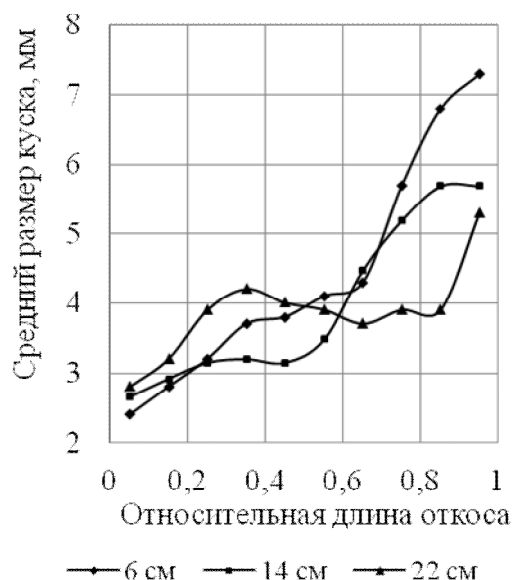


Рисунок 6 Изменение среднего размера кусков по длине откоса при разной высоте падения материала на откос

По мере увеличения высоты падения потока разница между средней крупностью агломерата в крайних зонах уменьшается, и при высоте падения  $h=22$  см крупность кусков у подножия только в 1,8 раза выше, чем на вершине откоса. Таким образом, с увеличением высоты падения потока на откос распределение агломерата по средней крупности кусков на откосе становится более равномерным.

Наблюдавшееся выравнивание ситового состава агломерата по длине откоса, по видимому, вызвано следующим.

При увеличении высоты падения материала на откос (увеличении кинетической энергии потока) крупные куски частично задерживаются на его вершине и в результате распределяются по длине откоса более равномерно. В то же время часть мелочи верхней зоны в результате неупругого соударения с крупными кусками получает дополнительную энергию и перемещается к подножию откоса, также распределяясь по его длине более равномерно.

Значительное увеличение содержания мелочи в нижней части откоса приводит к повышению неоднородности материала у подножия (рис. 7). Коэффициент вариации размера кусков в нижней половине откоса при увеличении высоты падения потока в 3,5 раза возрастает в среднем в 1,2 раза и приближается к коэффициенту вариации размера кусков исходного ситового состава материала.

В результате количественной оценки степени развития сегрегации агломерата в зависимости от высоты его падения на откос установлено, что с увеличением высоты падения потока сегрегация материала существенно ослабевает. Так, по опытным данным показатель сегрегации  $Z$  при увеличении высоты падения потока в 3,5 раза (с 6 см до 22 см) уменьшился почти в 2 раза (с 0,37 до 0,19).

В целом в результате обработки опытных данных установлено, что взаимосвязь показателя сегрегации  $Z$  с параметрами откоса описывается уравнением вида

$$Z = a \cdot \bar{d}_n \cdot M \cdot \frac{1}{L_1} \cdot \exp(-v \cdot \bar{d}_n \cdot M \cdot \frac{1}{L_2}), \quad (8)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — комплексные параметры, характеризующие условия формирования откоса, такие как угол наклона поверхности откоса  $\beta$ , его протяжённость  $l_{отк}$  и высота падения материала на откос  $h$ .

Для исследованных материалов и условий проведения опытов эти параметры определялись по уравнениям:

$$\begin{aligned} L_1 &= (\sin \beta)^4 \cdot l_{отк}^{1,5} \cdot (1 + 10h); \\ L_2 &= l_{отк} \cdot (\sin \beta)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

При этом численные значения эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$  были соответственно равны 0,014 и 0,026. Анализ всех опытных данных (всего было проведено свыше 100 экспериментов) показал, что уравнение (8) удовлетворительно описывает зависимость показателя сегрегации  $Z$  от условий формирования откоса материалов и учитывает особенность сегрегации различных неоднородных сыпучих материалов. Теснота связи между показателями  $Z$ , рассчитанными по уравнению (8) и полученными в результате обработки соответствующих экспериментальных данных по всем опытам, характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,94.

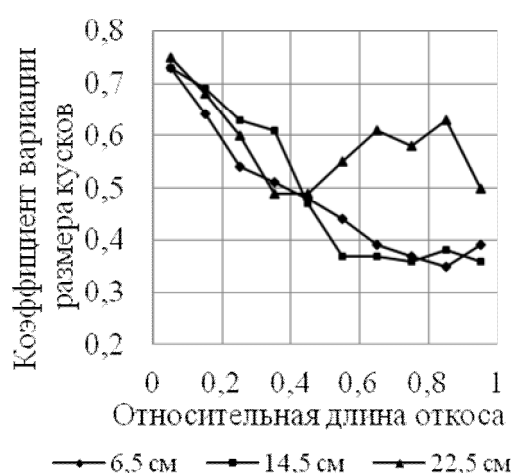


Рисунок 7 Изменение коэффициентов вариации размера кусков по длине откоса при разной высоте падения материала

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате проведённых исследований установлено, что на развитие сегрегации неоднородного сыпучего материала оказывают определённое влияние условия формирования откоса. При этом увеличение высоты падения материалов на откос, его протяжённости и угла наклона поверхности к горизонту препятствует развитию сегрегации, а их уменьшение, напротив, способствует развитию сегрегации материалов по крупности на

откосе. Установленные закономерности сегрегации позволяют разрабатывать мероприятия по совершенствованию технологических процессов с учётом влияния основных факторов на распределение материалов на откосе. В частности, полученные зависимости использовались для улучшения распределения шихты на агломашинах АМК. Для широкого использования этих зависимостей необходимо уточнить значения коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (8) для конкретных условий.

### Библиографический список

1. Петрушов, С. Н. Регулирование сегрегации шихты при укладке на агломашину [Текст] / С. Н. Петрушов, В. А. Лебедев, Л. Ф. Михайлова, А. И. Капуста, Л. М. Рудаков // *Сталь*. — 1983. — № 6. — С. 6–8.
2. Фролов, Ю. А. Исследование сегрегации агломерационных шихт [Текст] / Ю. А. Фролов, С. Г. Братчиков, Е. Е. Заславский, В. Ш. Статников // *Сталь*. — 1974. — № 10. — С. 882–888.
3. Русяков, П. Г. Исследование закономерностей распределения неоднородного сыпучего материала по откосу [Текст] / П. Г. Русяков, И. Ф. Русанов, В. Г. Морозов // *Известия ВУЗов : Чёрная металлургия*. — 1985. — № 6. — С. 15–19.

© Русанов И. Ф.

© Русанова Н. И.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В., зам. нач. ККЦ по технологии филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Швец Д. В.*

*Статья поступила в редакцию 01.03.19.*

**к.т.н. Русанов И. Ф., к.ф-м.н. Русанова Н. И. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**  
**ВПЛИВ УМОВ ФОРМУВАННЯ УКОСУ НА СЕГРЕГАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ**  
**ЗА КРУПНІСТЮ НА ЙОГО ПОВЕРХНІ**

*На підставі експериментальних даних зроблено оцінку впливу фізичних властивостей матеріалів і умов формування укосу (кута нахилу утворюючої укосу, його довжини й висоти падіння матеріалів на нього). Наводиться рівняння, що описує вплив перелічених факторів на показник сегрегації.*

**Ключові слова:** сегрегація, узагальнені характеристики ситового складу, середній розмір шматків, коефіцієнт варіації розміру шматків, умови формування укосу, фізичні властивості матеріалів.

**PhD Rusanov I. F., PhD in Physics and Maths Rusanova N. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**  
**INFLUENCE OF SLOPE FORMATION CONDITIONS ON THE SEGREGATION OF**  
**MATERIALS BY SIZE OVER INCLINED SURFACE**

*Based on the experimental data, an assessment was made concerning the influence of physical properties of materials and the slope formation conditions (the angle of inclination of the forming slope, its length, and the height of the materials falling on the slope). An equation describing the effect of these factors on segregation is given.*

**Key words:** segregation, generalized characteristics of the sieve composition, average size of the pieces, size variation coefficient of the pieces, conditions for slope formation, physical properties of materials.