

5. Авдохин В.М. Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд / В.М.Авдохин, С.Л.Губин // Горный журнал. – 2007. - № 2. – С. 58 – 64.

6. Остапенко П.Е. Обогащение железных руд / М.: Недра, 1977. – 274 с.

7. Пирогов Б.И. Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов. М.: Недра, 1969. – 210 с.

8. Кармазин В.И., Мостепан Л.Ф., Левченко К.А. О повышении эффективности высокоградиентного обогащения илистых фракций окисленных железистых кварцитов ЦГОКа при использовании сетчатой матрицы с вертикальным намагничиванием // Современное состояние и перспективы развития техники и технологии магнитного обогащения руд и материалов – Кривой Рог, 1994. – С. 29-30.

9. Гвоздик В.С. Экспериментальное наблюдение при механическом воздействии на гематит и кварц / В.С. Гвоздик // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ, 2002. – С. 86-89.

10. Малый В.М. Разработка технологии обогащения окисленных железных руд / В.М. Малый, Т.Б. Ганзенко, Е.А. Титлянов // Обогащение слабомагнитных руд черных металлов. – М.: Недра, 1984. – С. 12-16.

Рукопис подано до редакції 04.04.2019

УДК 622.341.1:620.17

С.Г. САВЕЛЬЕВ, д-р техн. наук, доц., М.Н. КОНДРАТЕНКО, ассистент
Криворожский национальный университет

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ АГЛОМЕРАТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕГО ПРОЧНОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАРАБАНЕ

Показано большое значение механической прочности агломерата для улучшения технико-экономических показателей доменной плавки. Наиболее распространенными показателями механической прочности является результаты барабанного испытания агломерата, которые в значительной степени обусловлены характером движения материала в ходе испытания. Понимание характера движения отдельных частиц материала в ходе барабанного испытания позволяет подойти к прогнозной оценке ударных и истирающих усилий, оказываемых на пробу.

Целью работы является анализ характера движения частиц пробы агломерата в процессе ее обработки во вращающемся барабане по стандартной методике.

Методы научного исследования. В работе использованы общелогические методы научного исследования – анализ и синтез, аналогия, обобщение.

Научная новизна работы состоит в развитии на основе теоретических расчетов и анализа полученных результатов представлений о характере движения частиц пробы агломерата в процессе ее обработки во вращающемся барабане по стандартной методике. Показано, что характерные особенности барабанного испытания – низкая степень заполнения барабана (на уровне 1,9÷2,2 %), неоднородность гранулометрического состава пробы и его изменчивость в процессе испытания, наличие на внутренней поверхности барабана двух симметрично расположенных полочек, высота которых больше максимального размера куска агломерата – обуславливают неодинаковый характер движения отдельных частей.

Практическая значимость работы заключается в получении исходных данных для дальнейшего исследования процесса обработки материала во вращающемся барабане с целью количественного определения частей пробы, отличающихся характером движения, а также оценки ударных и истирающих нагрузок, испытываемых различными частями пробы в ходе барабанного испытания по стандартной методике.

Результаты работы свидетельствуют о том, что те части пробы, которые не удерживаются полочками, движутся в режиме переката или каскадном. А те части пробы, которые удерживаются полочками, в зависимости от крупности, будут либо центрифугировать, либо падать вертикально вниз, достигнув верхней точки окружности барабана.

Ключевые слова: агломерат, проба, барабанное испытание, частица, характер движения.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-107-113

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Офлюсованный железорудный агломерат в настоящее время является основным сырьем доменных печей. Так, в условиях Украины его доля в рудной части доменной шихты составляет около 70 %. Важнейшей характеристикой качества агломерата является его холодная прочность [1, 2]. При этом считается [3, с. 183, 184], что повышение холодной прочности агломерата представляет собой значительный резерв повышения технико-экономических показателей работы доменных печей.

Наиболее распространенным методом определения холодной прочности окускованного железорудного сырья является испытание во вращающемся барабане. Для оценки прочности в середине 80-х годов прошлого века было известно девять методик [4, с. 100], отличающихся

характеристикой барабана, массой пробы, а также фракциями крупности, по которым оценивается прочность. В настоящее время на Украине действует национальный нормативный документ, гармонизированный методом перевода с международных и европейских нормативных документов, ДСТУ ISO 3271:2017 (ISO 3271:2015 IDS) «Руды железные для доменной печи и для сырья прямого восстановления. Метод определения коэффициентов прочности и истирания», введенный в действие с 1 июля 2018 года Приказом № 232 от 15.08.2017 по ГП «УкрНИОЦ», который регламентирует методику барабанного испытания агломерата.

Характер движения частиц агломерата во вращающемся барабане, оснащенном внутренними устройствами, в процессе определения прочности и истираемости представляет собой частный случай движения кускового сыпучего материала, имеющего максимальный условный диаметр более 10 мм [5, с. 4], закономерности которого изучены недостаточно. Это осложняет теоретическую оценку динамических нагрузок, испытываемых пробой агломерата, и, следовательно, степень разрушения материала в ходе барабанного испытания.

В этой связи является актуальным анализ характера движения частиц агломерата при определении его прочности во вращающемся барабане, позволяющем дать прогнозную оценку коэффициентов прочности и истираемости.

Анализ исследований и публикаций. Характер движения материала во вращающемся барабане зависит от степени его заполнения, скорости вращения и состояния внутренней поверхности. Установлено, что при обработке железорудной шихты в процессе производства окускованного продукта возможны четыре режима движения материала: челночный, переката, водопадный и циклический [6, с. 36], последовательный переход которых от одного к другому обусловлен увеличением степени заполнения барабана и повышением скорости его вращения.

Водопадный режим имеет три участка траектории движущихся частичек сыпучего материала – круговой, параболический и наклонного ссыпания по поверхности остального материала. Водопадный режим может возникнуть только в случае перехода материала во второй квадрант барабана. Кроме скорости вращения барабана, оказывающей решающее влияние, переход материала во второй квадрант будет зависеть и от степени заполнения барабана. При малой степени заполнения (около 5 %) водопадный режим, как правило, не возникает [7, с. 227].

В зависимости от скорости вращения и коэффициента заполнения барабана при работе барабанной мельницы различают следующие режимы: каскадный, водопадный, смешанный, со сверхкритической скоростью [8, с. 128]. При каскадном режиме (без подбрасывания измельчающей среды) вся рудная нагрузка совершает движение в сторону вращения мельницы и скатывается параллельными слоями (каскадом) вниз. При водопадном режиме рудная нагрузка поднимается на большую высоту и падает водопадом по параболическим траекториям. Характерными точками водопадного режима движения являются следующие: точка перехода с круговой траектории на параболическую; точка, соответствующая вершине параболы; точка падения шара на его круговую траекторию, которые можно рассчитать по известным уравнениям [9, с. 190-192].

Смешанный режим характеризуется перекачиванием и частичным подбрасыванием рудной нагрузки. Режим со сверхкритической скоростью наступает при скорости вращения барабана равной или превосходящей критическую. Наружный слой рудной нагрузки начинает центрифугировать, а внутренние слои сохраняют водопадный режим [8, с. 129].

Характер движения частиц сыпучего материала в поперечном сечении барабана с внутренним устройством в виде лопастной Г-образной насадки можно разделить на четыре стадии [10, с. 26]: 1) движение в завале; 2) движение вместе с лопастью; 3) движение по лопасти; 4) свободное падение с лопасти. При этом в зависимости от степени заполнения барабана сыпучим материалом, формы и размера лопастей возможны два предельных случая: 1) лопасть полностью перекрывается материалом, находящимся в завале; 2) ссыпающийся край лопасти находится выше линии завала [10, с. 27]. В первом случае, т. е. при большом заполнении барабана материалом, движение материала в завале можно рассматривать, не учитывая влияния лопастей. Во втором случае можно вообще не рассматривать завал и ограничиться только рассмотрением трех остальных стадий движения.

Приведенный анализ исследований и публикаций показывает, что, несмотря на большое число работ, посвященных различным условиям движения сыпучих материалов во вращающемся барабане, отсутствуют исследования характера движения материала в барабане, имеющем

низкую степень заполнения и оснащенным внутренним устройством в виде равносторонних уголков. Именно эти особенности присущи методике определения прочности агломерата по нормативному документу ДСТУ ISO 3271 2017.

Постановка задачи. Задача настоящей работы заключается в анализе характера движения частиц агломерата при определении его прочности во вращающемся барабане по стандартной методике.

Изложение материала и результаты. Исследуем характер движения материала при барабанном испытании агломерата. Учтем, что некоторая часть испытуемого материала захватывается двумя полочками (уголками, приваренными на одинаковом расстоянии друг от друга вдоль оси барабана), а другая часть – прижимается к гладкой внутренней поверхности барабана между полочками.

Для определения критической частоты вращения барабана изобразим схемы с силами, действующими на кусочки агломерата: прижатые к поверхности барабана – на рис. 1а, захваченные полочками – на рис. 1б.

На частицу, не захваченную полкой и прижимаемую к внутренней поверхности барабана, действует вес $G = mg$, который раскладывается на радиальную G_R и тангенциальную G_T составляющие. Сила трения уравнивается тангенциальной составляющей веса. Согласно рис. 1а при некоторой скорости движения частицы по круговой траектории в точке А радиальная сила G_R может стать равной центробежной силе C

$$G_R = C. \quad (1)$$

Момент отрыва частицы от поверхности барабана определяется равенством центробежной силы $C = mv^2/R_i$ и радиальной составляющей веса $G_R = mg \cos \alpha$, где m и v – соответственно масса и окружная скорость частицы испытуемого материала, R_i – расстояние от центра масс частицы до центра вращения; g – ускорение свободного падения. От точки А эта частица под действием силы тяжести начнет двигаться как тело, брошенное со скоростью v под некоторым углом α к горизонту, т.е. по параболической траектории. Угол отрыва частицы от круговой траектории будет равен α и в точке А будет справедливо соотношение

$$mg \cos \alpha = mv^2/R_i. \quad (2)$$

Расстояние R_i зависит от размера частицы и может быть записано выражением

$$R_i = D/2 - a_i/2, \quad (3)$$

где $D = 1$ м – диаметр барабана; a_i – размер частицы испытуемого материала; $a_i = 5 \div 40$ мм.

Из выражения (2) получаем

$$v^2 = R_i g \cos \alpha. \quad (4)$$

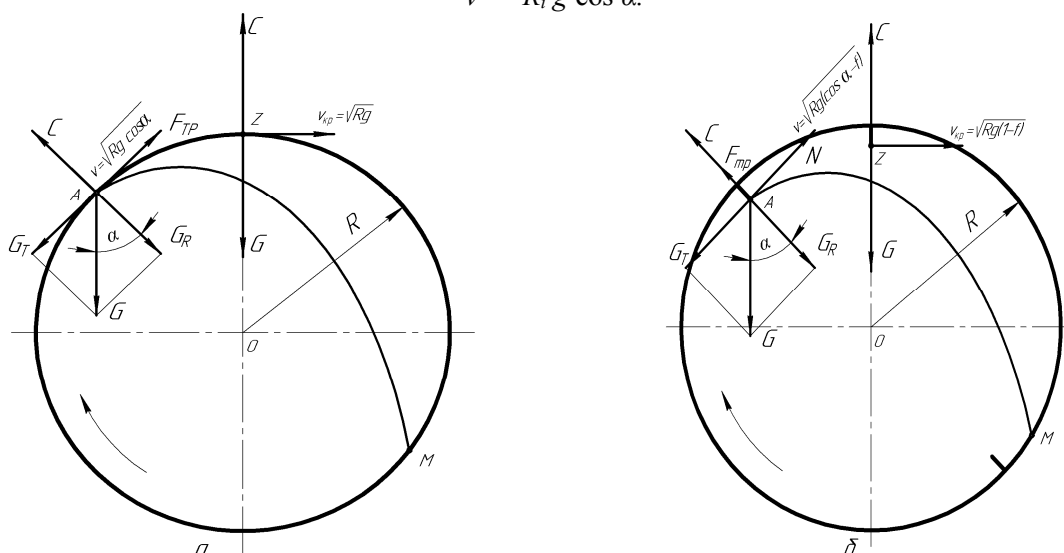


Рис. 1. Силы, действующие на частицы испытуемого материала во вращающемся барабане

Линейная скорость частицы, вращающейся с постоянной частотой вращения n , об./мин. по окружности с радиусом R_i :

$$v = \pi R_i n / 30. \quad (5)$$

Подставив равенство (5) в уравнение (4), получим выражение частоты вращения барабана, при которой частица материала, не захваченная полочками, перейдет с круговой траектории на параболическую при угле отрыва α

$$n = 30/\pi \sqrt{g \cos \alpha / R_i} . \quad (6)$$

При $\alpha_l = 0^\circ$, когда частица поднимется по круговой траектории до наивысшей точки Z (рис. 1а) центробежная сила должна быть максимальной, уравнивающей вес частицы G . При постоянных массе, размере частицы, радиусе движения увеличение центробежной силы может быть вызвано только увеличением линейной скорости её движения, в свою очередь прямо пропорциональной частоте вращения частицы. Из формулы (6) при $\cos 0^\circ = 1$ критическая частота вращения барабана, об./мин., при которой частицы, расположенные на внутренней поверхности барабана, начали бы центрифугировать, определяется по формуле

$$n_{кр} = 30/\pi \sqrt{g / R_i} . \quad (7)$$

Значение критической частоты вращения барабана в зависимости от величины кусков агломерата a_i , расстояния R_i дано в табл. 1.

Таблица 1

Критическая частота вращения барабана $n_{кр}$, об./мин., для материала, не захваченного полочками

a_i , мм							
5	10	15	20	25	30	35	40
R_i , м							
0,49625	0,49375	0,49125	0,48875	0,48625	0,48375	0,48125	0,48
$n_{кр}$, об./мин.							
42,404246	42,51119	42,61895	42,7275357	42,83695	42,94722	43,05833	43,17032

На частицу агломерата, захваченную полочкой, также действует вес $G = mg$, который раскладывается на радиальную G_R и тангенциальную G_T составляющие (рис. 1б). Но сила трения, всегда направленная вдоль поверхности в сторону, противоположную движению, в данной ситуации действует вдоль полочки, перпендикулярно поверхности барабана. Она совпадает по направлению с центробежной силой C . При этом (1) запишется в виде

$$G_R = C + F_{тр}.$$

Сила трения равна $F_{тр} = m g f$, где $f = 0,9$ – коэффициент трения покоя агломерата [11, с. 12]. Уравнение (2) приобретет вид $mg \cos \alpha = mv^2 / R_i + mgf$, а формула (4) переписывается в виде

$$v^2 = R_i g (\cos \alpha - f). \quad (8)$$

Подставив уравнение (5) в (8) получим выражение частоты вращения барабана, при которой частица материала перейдет с полочки на параболическую траекторию при угле отрыва α :

$$n_l = 30/\pi \sqrt{g(\cos \alpha - f) / R_i^l} . \quad (9)$$

Так как часть материала, захватываемого полочками, будет располагаться ближе к центру барабана, формула (3) будет выглядеть следующим образом:

$$R_i^l = D/2 - l - a_i/2 ,$$

где $l = 0,05$ м – ширина полочки.

Также, как и в первом случае, когда частица поднимется по круговой траектории до наивысшей точки Z (рис. 1б), а угол $\alpha_l = 0^\circ$, центробежная сила должна быть максимальной, уравнивающей вместе с силой трения $F_{тр}$ вес частицы G . При постоянных массе, размере частицы, радиусе движения и коэффициенте трения увеличение центробежной силы может быть вызвано только увеличением линейной скорости её движения, в свою очередь прямо пропорциональной частоте вращения частицы. Из формулы (5) при $\cos 0^\circ = 1$ критическая частота вращения барабана, об./мин., при которой частицы, расположенные на внутренней поверхности полочки, начали бы центрифугировать, определяется по формуле

$$n_{кр} = 30/\pi \sqrt{g(1 - f) / R_i} , \quad (10)$$

Значение критической частоты вращения барабана с учетом приваренных полочек в зависимости от величины кусков агломерата a_i и расстояния R_i^l дано в табл. 2.

Таблица 2

Критическая частота вращения барабана $n_{кр}$, об./мин., для материала, захваченного полочками

a_i , мм							
5	10	15	20	25	30	35	40
R_i , м							
0,49625	0,49375	0,49125	0,48875	0,48625	0,48375	0,48125	0,48
$n_{кр}$, об./мин.							
14,138696	14,17836	14,21835	14,2586874	14,29937	14,3404	14,38179	14,42353

Критическая частота увеличивается с увеличением размера кусков испытуемого материала в обоих случаях, но её значения для случая рис. 1а и рис. 1б отличаются в 3 раза.

Определим долю критической частоты вращения $\psi = n/n_{кр}$.

В таблице 3, 4 представлены значения доли действительной частоты вращения барабана $n = 25$ об./мин. от критических частот согласно табл. 1, 2.

Таблица 3

Доли действительной частоты вращения барабана ψ , доли ед., от критической частоты вращения для материала, не захваченного полочками

a_i , мм							
5	10	15	20	25	30	35	40
ψ , дол. ед.							
0,5896	0,5881	0,5866	0,5851	0,5836	0,5821	0,5806	0,5791

Таблица 4

Доли действительной частоты вращения барабана ψ , доли ед., от критической частоты вращения для материала, захваченного полочками

a_i , мм							
5	10	15	20	25	30	35	40
ψ , дол. ед.							
1,768197	1,763251	1,758291	1,75331707	1,748329	1,743327	1,73831	1,733279

Из табл. 3 и 4 следует, что для материала, не захваченного полочками, действительная частота вращения барабана почти в 2 раза меньше критической. В соответствии с этим режим вращения этой части пробы, скорее всего, будет каскадным или режимом переката. Из-за наличия силы трения материал, захваченный полочками, имеет в 1,7 раз большую критическую действительную частоту вращения. Скорее всего, он либо будет центрифугировать, либо падать вертикально вниз после прохождения самой верхней точки круговой траектории.

В подтверждение сделанных выводов определим угол отрыва частиц материала от стенок барабана (т. А на рис. 1) при частоте вращения $n = 25$ об./мин. Для этого из выражений (5) и (9) найдем угол α .

Для материала, не захваченного полочками из (5) следует

$$\cos \alpha = n^2 \pi^2 R_i / (30^2 g), \quad (11)$$

$$\alpha = \arccos \left[n^2 \pi^2 R_i / (30^2 g) \right]. \quad (12)$$

Значение угла отрыва α частиц материала от стенок барабана (без учета приваренных полочек) в зависимости от коэффициента трения и размера частиц представлены в табл. 5.

Таблица 5

Значение угла отрыва α , град., частиц материала, не захваченного полочками, при существующей частоте вращения $n = 25$ об./мин.

a_i , мм							
5	10	15	20	25	30	35	40
R_i , м							
0,49625	0,49375	0,49125	0,48875	0,48625	0,48375	0,48125	0,48
α , град.							
69,66031	69,76701	69,87363	69,98018	70,08665	70,19306	70,29939	70,40565

Для материала, захваченного полочками

$$\cos \alpha = n^2 \pi^2 R_i / (30^2 g) + f, \quad (13)$$

$$\alpha = \arccos \left[n^2 \pi^2 R_i / (30^2 g) + f \right]. \quad (14)$$

В связи с тем, что $\cos \alpha$ не может быть больше единицы, из формулы (13) вытекает ограничение максимального значения коэффициента трения

$$f \leq 1 - n^2 \pi^2 R_i / (30^2 g). \quad (15)$$

Для любого размера частиц агломерата, отобранного для барабанной пробы ($a_i = 5 \div 40$ мм), неравенство (15) не выполняется из-за большого коэффициента трения ($\cos \alpha = 1,85$ по (13)). Однако, согласно схеме на рис. 1б, в крайней верхней точке Z барабана направление веса G совпадает с центробежной силой C – обе силы вертикальны. При этом исчезает тангенциальная составляющая веса G_T , вместе с которой исчезает и сила трения. Следовательно, без коэффициента трения f уравнение (13) превращается в (11), а (14) – в (12). Частицы же агломерата должны подниматься полочкой в крайнее верхнее положение, а оттуда – либо падать вниз по вертикальной траектории, либо продолжать вращение вместе с барабаном. Это подтверждает вывод о центрифугировании либо циклическом режиме вращения частиц, захваченных полочками, сделанный после таблицы 4.

Определим коэффициент загрузки при барабанном испытании.

Объем барабана равен

$$V_b = (\pi D^2 / 4) L = (\pi \cdot 1^2 / 4) 0,5 = 0,3927 \text{ м}^3.$$

Насыпная масса агломерата [11, с. 12] $\rho = 1,7 \div 2,0 \text{ т/м}^3$. Тогда объем испытуемого материала массой 15 кг составит

$$V_a = m / \rho = 15 \cdot 10^3 / (1,7 \div 2,0) = 0,008824 \div 0,0075 \text{ м}^3.$$

Определим коэффициент загрузки при барабанном испытании

$$\varphi = V_a / V_b = [(0,008824 \div 0,0075) / 0,3927] \cdot 100\% = 2,247 \div 1,91\%.$$

Согласно [7, с. 227] степень заполнения барабана 5 % уже считается малой. При ней, как правило, не возникает водопадный режим. В барабанной же пробе эта величина более чем в 2 раза меньше. Это еще раз подтверждает, что материал, не захваченный полочками, движется в барабане в режиме переката или каскадном. Материал же захваченный полочками либо центрифугирует, либо движется в циклическом режиме, падает вниз после прохождения верхней точки круговой траектории.

Выводы и направление дальнейших исследований. Характер движения частиц агломерата при его испытании во вращающемся барабане по стандартной методике обусловлен сравнительно низкой степенью заполнения барабана – $1,9 \div 2,2$ %, неоднородным и изменяющимся в процессе испытания гранулометрическим составом материала, наличием на внутренней поверхности барабана двух симметрично расположенных полочек, высота которых больше максимального размера куска агломерата. Вследствие этих особенностей методики барабанного испытания, характер движения отдельных частей пробы не одинаков. Части пробы, не удерживаемые полочками, движутся в режиме переката или каскадном. Части пробы, которые удерживаются полочками, в зависимости от крупности, будут либо центрифугировать, либо падать вертикально вниз, достигнув верхней точки окружности барабана.

Дальнейшее направление исследований может быть связано с задачей количественного определения частей пробы, отличающихся характером движения, а также оценкой ударных и истирающих нагрузок, испытуемых различными частями пробы.

Список литературы

1. Губин Г.В. Оценка показателей качества железорудного сырья и их влияния на работу доменной печи / Г.В. Губин, С.Г. Савельев, В.О. Равинская // Качество минерального сырья. Сб. научн. трудов. Т. 1. Кривой Рог: ФЛП Чернявский Д.А., 2017. – С. 83-91.
2. Паталах А.А. Металлургические свойства сырья. Современные методы испытаний / А.А. Паталах // Новое в технологии и технике переработки минерального сырья. Сб. научн. трудов. Кривой Рог: ОАО «Механобрчермет, 2008. – С. 174-184.
3. Metallurgiya chuguna. / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др. // М: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
4. Производство агломерата и окатышей / С.В. Базилевич, А.Г. Астахов, Г.М. Майзель и др. // М.: Metallurgiya, 1984, – 216 с.
5. Шубин И.Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства / И.Н. Шубин, М.М. Свиридов, В.П. Таров // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 76 с.
6. Бережной Н.Н. Производство железорудных окатышей / Н.Н. Бережной, В.В. Булычев, А.И. Костин // М.: Недра, 1977. – 240 с.
7. Коротич В.И. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский // Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
8. Кармазин В.И. Бесшаровое измельчение руд / В.И. Кармазин, А.И. Денисенко, Е.Е. Серго // М.: Недра, 1968, – 184 с.
9. Петров В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / В.А. Петров, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко // М: Недра, 1990. – 301 с.
10. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В.Ф. Першин, В.Г. Однолюбо, С.В. Першина // М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
11. Маликов О.Б. Склады промышленных предприятий / О.Б. Маликов, А.Р. Малкович // Л.: Машиностроение. 1989. – 672 с.

Рукопись поступила в редакцию 08.04.2019