

УДК 669.162.2

*к.ф.-м.н. Русанова Н. И.,  
к.т.н. Русанов И. Ф.*

*(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)*

## РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИФРАКЦИОННЫХ АГЛОМЕРАТА И КОКСА

*На основании опытных данных определены коэффициенты формы кусков отдельных фракций агломерата и кокса. Установлена их зависимость от размера фракции. Разработана методика расчета удельной поверхности полифракционного материала по обобщенным характеристикам его ситового состава.*

**Ключевые слова:** *агломерат, кокс, удельная поверхность кусков агломерата и кокса, обобщенные характеристики ситового состава, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков, удельная поверхность полифракционного материала.*

Одной из важнейших обобщенных характеристик слоя сыпучих материалов является удельная поверхность, определяемая отношением поверхности к единице объема или массы, как единичного кусочка (частицы, гранулы, зерна), так и материала в целом.

Для элементов, имеющих правильную форму (шара, куба, цилиндра и т. д.), расчет удельной поверхности по их известным размерам не вызывает особых трудностей. Расчет же поверхности кусков полифракционного материала, когда они имеют неправильную форму, какими являются шихтовые материалы доменного производства, затруднен. При этом необходимо провести специальные исследования по определению коэффициента формы всех фракций материала, а затем по его ситовому составу рассчитать удельную поверхность материала в целом.

С целью упрощения расчета удельной поверхности шихтовых материалов необходимо установить такие зависимости, которые позволили бы проводить расчет без проведения дополнительных исследований, имея лишь данные о ситовом составе материала, что даст возможность проводить анализ процессов, протекающих на поверхности материалов, и совершенствовать их. К таким процессам относятся процессы, связанные с движением газа в слое материалов, теплообменом в нем,

протеканием физико-химических взаимодействий.

В данной работе поставлены следующие задачи: на основании опытных данных определить коэффициенты формы кусочков отдельных фракций агломерата и кокса, установить их зависимость от размера фракции; разработать методику расчета удельной поверхности полифракционных агломерата и кокса, используя данные об их ситовом составе.

Удельная поверхность материалов может определяться как на единицу их объема, так и на единицу массы. При этом используются физические или расчетные методы.

К физическим методам относятся фильтрационный и метод адсорбции меченых атомов или красителей. Эти методы широко используются для определения удельной поверхности горных пород (алевритов, глин, песков и др.), а также строительных и других материалов, состоящих из частиц малого размера [1]. Проведение анализа с использованием физических методов требует специального оборудования и затрат средств и времени, что не позволяет использовать их для определения удельной поверхности шихтовых материалов доменной плавки, таких как агломерат и кокс.

Так как удельная поверхность материалов зависит от степени их дисперсности, предложены расчетные методы, основанные на

данных о гранулометрическом (ситовом) составе полифракционного материала [2].

При расчете удельной поверхности полифракционных материалов по их ситовому составу используются выражения вида

$$S = \sum S_{y\partial} \cdot a = \int_0^{d_{\max}} S_{y\partial} \cdot f(d), \quad (1)$$

где  $S$  — поверхность единицы массы или объема материала,  $\text{м}^2/\text{кг}$  или  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $S_{y\partial}$  — удельная поверхность единичного кусочка размером  $d$ ,  $\text{м}^2/\text{кг}$  или  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $a$  — количество кусочков размером  $d$ ;  $f(d)$  — функция распределения, определяющая количество кусочков одинакового размера в материале.

При расчетном определении удельной поверхности обычно предполагается, что форма частиц материала шарообразная и их размер характеризуется эквивалентным диаметром шара, объем которого равен объему частицы. Такой подход вполне оправдан, потому что только объект сферической формы может быть охарактеризован одним параметром — его диаметром.

Частицы же реальных дисперсных крупных материалов имеют разнообразную геометрическую форму, отличную от идеальных геометрических тел. Согласно принятому условному делению частицы неправильной формы могут быть округленными (окатанными), угловатыми (кубоподобные), удлиненными (продолговатые) и плоскими (пластинчатые). Оценка формы частицы при этом носит субъективный характер.

Учитывая, что точная оценка действительной формы частиц материала практически невозможна, а шар является идеальным геометрическим телом, которое имеет максимальный объем при минимальной поверхности, в результате подсчетов по известным методикам находится некоторая условная поверхность, меньшая, чем действительная.

Для приближения расчетной удельной поверхности тел неправильной формы к действительной введены понятия сферич-

ности и коэффициента формы. Под сферичностью, по определению Х. Уоделлома, понимается отношение поверхности сферы (того же объема, что и частица) к площади поверхности частицы.

Обратная сферичности характеристика является коэффициентом формы частицы. Численные значения этих характеристик могут быть определены после экспериментального определения эквивалентных диаметров шаров.

В зависимости от выбранного определяющего фактора эквивалентный диаметр определяется по различным формулам. Если определяющим фактором является объем частиц, их заменяют шарами такого же объема, а если поверхность — шарами такой же площади [3].

Эквивалентные диаметры шаров при этом определяются по формулам

$$d_V = \left( \frac{6 \cdot V}{\pi} \right)^{1/3}, \quad d_S = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $d_V$  — эквивалентный диаметр шара по объему;  $V$  — объем частицы;  $d_S$  — эквивалентный диаметр шара по поверхности;  $S$  — поверхность частицы.

Коэффициент формы  $\Phi$  определяется по соотношению

$$\Phi = \frac{d_S^2}{d_V^2} = \frac{S_{y\partial} \cdot d_V}{6}. \quad (3)$$

Для шара коэффициент формы  $\Phi$  равен единице, для остальных тел, в том числе и для кусочков шихтовых материалов доменной плавки, он больше единицы.

Для Платоновых тел (правильных многогранников) значения коэффициентов сферичности  $f$  и формы  $\Phi$  и приведены в таблице 1.

Значения коэффициентов сферичности и формы для реальных частиц неправильной формы, в соответствии с приведенным выше их условным делением по форме, по данным авторов работы [4], приведены в таблице 2.

Таблица 1  
Значения коэффициента формы и сферичности  
Платоновых тел

Тело	$f$	$\Phi$
Тетраэдр	0,67	1,49
Куб	0,81	1,24
Октаэдр	0,85	1,18
Додекаэдр	0,91	1,10
Икосаэдр	0,93	1,07

Таблица 2  
Значения коэффициента формы и сферичности  
реальных частиц

Форма частицы материала	$f$	$\Phi$
Округленная	0,77	1,30
Угловатая	0,66	1,52
Продолговатая	0,58	1,72
Пластинчатая	0,43	2,33

Согласно формуле (3), для расчета коэффициента формы кусков необходимо определить два эквивалентных диаметра  $d_V$  и  $d_S$ . Эти диаметры могут быть определены по опытным данным, в ходе которых надлежит определить объем и поверхность опытного образца.

Для определения объема реальных кусочков агломерата и кокса был использован метод гидростатического взвешивания парафинированных кусков пробы, основанный на трех взвешиваниях образца. Образец взвешивался на воздухе ( $m_1$ ), затем он покрывался тонким слоем парафина и взвешивался на воздухе ( $m_2$ ) и в воде ( $m_3$ ).

По результатам взвешиваний и известной плотности парафина  $\rho$  вычисляли объем кусочка  $V_K$  и объем парафина  $V_{нар}$  по формулам

$$V_K = m_2 - m_3 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{нар}}, \quad (4)$$

$$V_{нар} = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{нар}}, \text{ см}^3.$$

Методика расчета объема пористых тел по результатам трех взвешиваний исполь-

зуется при определении кажущейся плотности материалов [5].

После расчета объема парафина, помещенного на покрытие кусочка, замерялась толщина слоя парафина  $\delta$  и определялась его поверхность по очевидному соотношению  $S = V_{нар} / \delta$ . Толщину слоя парафина с достаточной точностью можно измерить при помощи измерительного микроскопа или микрометра с иглами, жестко закрепленными на торцах пятки и микрометрического винта.

При замере толщины слоя парафина микроскопом слой парафина осторожно срезается перпендикулярно поверхности кусочка в нескольких местах. Затем он устанавливается на подставку так, чтобы плоскость среза была перпендикулярна оптической оси микроскопа. Далее замер производится согласно инструкции к микроскопу. По полученным таким образом для нескольких срезов значениям  $\delta$  рассчитывается средняя толщина слоя парафина.

По описанной методике для кусочков агломерата и кокса различных классов крупности были определены объем, площадь поверхности и кажущаяся плотность. Количество кусочков каждой фракции составляло 20–25 шт. Кусочки одной фракции отбирались произвольно, однако при этом стремились, чтобы они существенно отличались по крупности.

Опробование методики и оценка погрешностей измерения проведены на окатышах, форма которых близка к шарообразной. Объем и площадь поверхности образцов определялись двумя способами. По первому способу определялся диаметр в десяти сечениях при помощи штангенциркуля. Затем по этим замерам находился средний размер окатыша и в предположении, что окатыш имеет форму шара, вычислялись его объем и площадь поверхности.

Затем объем и площадь поверхности тех же образцов определялась по вышеописанной методике.

Сравнение вычисленных при обработке полученных результатов дисперсий по

F-распределению (распределению Фишера) показало, что различие в их значениях носит случайный характер и они являются приближенными оценками одной и той же генеральной совокупности.

Сопоставление средних значений, рассчитанных по двум способам, с использованием t-распределения показало, что статистически значимая разница между результатами опытов отсутствует и выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности.

По полученным экспериментальным данным установлена погрешность расчета значений рассматриваемых величин.

Абсолютная погрешность составила: при расчете объема образцов —  $\pm 0,032 \text{ см}^3$ , их площади поверхности —  $\pm 0,54 \text{ см}^2$  и удельной поверхности —  $\pm 0,176 \text{ см}^2/\text{см}^3$ .

При замере толщины парафина микрометром иглы подводятся к образцу и снимается показание с барабана. Затем трещоткой иглы углубляются в слой парафина

на до упора и снимается новое показание с барабана. По разнице показаний определяется удвоенная толщина парафина. Такая методика дает хорошие результаты для образцов, не имеющих больших пор, — среднеквадратичная погрешность составляет около 0,28, а относительная — не более 3 % отн. Для кусочков агломерата и кокса погрешность может быть намного больше, так как иглы могут проникать в поры большого радиуса и замеренная толщина парафина в этом случае будет существенно превышать действительную. В связи с этим толщину парафина при определении поверхности кусочков агломерата и кокса целесообразней определять при помощи микроскопа.

Осреднённые результаты исследований приведены в таблице 3.

Как следует из приведенных данных, с увеличением крупности кусочков агломерата их удельная поверхность уменьшается, а коэффициент формы увеличивается.

Таблица 3

Результаты экспериментального определения объема, поверхности, удельной поверхности и коэффициентов формы кусочков агломерата и кокса различных фракций

Материал	Характеристика	Размер фракции, мм				
		5–10	10–15	15–25	25–40	40–60
Агломерат	$V, \text{ см}^3$	0,36	1,05	2,93	6,15	Не определяли
	$S, \text{ см}^2$	2,88	6,27	13,06	23,62	
	$d_v, \text{ см}$	0,88	1,26	1,77	2,27	
	$d_s, \text{ см}$	0,96	1,41	2,04	2,74	
	$S_{уд}, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}$	8,02	6,00	4,46	3,84	
	$\Phi$	1,18	1,26	1,32	1,46	
Кокс	$V, \text{ см}^3$	0,13	0,79	4,78	20,61	45,36
	$S, \text{ см}^2$	1,51	5,40	19,76	54,56	100,14
	$d_v, \text{ см}$	0,63	1,15	2,09	3,4	4,43
	$d_s, \text{ см}$	0,69	1,31	2,51	4,17	5,65
	$S_{уд}, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}$	11,62	6,83	4,13	2,65	2,21
	$\Phi$	1,22	1,31	1,44	1,5	1,63

Это свидетельствует о том, что чем крупнее кусочки агломерата, тем их форма в большей степени отличается от сферической.

Сравнение полученных данных с данными таблицы 2 показывает, что мелкие кусочки агломерата имеют форму, близкую к округленной, а по мере увеличения их размера — к угловатой.

Зависимость коэффициента формы от размера кусочков агломерата  $d$  (см) описывается уравнением

$$\Phi = 0,19 \cdot d + 1,0. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации для этой зависимости равен 0,975.

После преобразования уравнения (3) и подстановки в него коэффициента формы кусочков  $\Phi$ , определяемого по формуле (5), их удельная поверхность на единицу объема будет определяться зависимостью

$$S_{y\partial}^v = \frac{6}{d} + 1,14, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}. \quad (6)$$

Кажущаяся плотность кусочков агломерата  $\rho$ , определенная во время экспериментов, находилась в диапазоне 3,47–3,63 г/см<sup>3</sup> и в среднем равнялась 3,55 г/см<sup>3</sup>. Учитывая небольшой диапазон изменения кажущейся плотности в первом приближении, можно считать, что она одинакова для кусочков разного размера и равна среднему значению. Тогда удельная поверхность кусочков на единицу массы будет определяться зависимостью

$$S_{y\partial}^m = \frac{S_{y\partial}^v}{\rho} = \frac{1,69}{d} + 0,32, \frac{\text{см}^2}{\text{г}}. \quad (7)$$

Качественное изменение определенных экспериментально и вычисленных характеристик для кокса и агломерата идентично. При этом численные значения коэффициента формы кусочков кокса больше.

Согласно данным таблицы 2, кусочки кокса имеют угловатую форму.

Для кокса зависимость коэффициента формы от размера кусочков  $d$  имеет следующий вид

$$\Phi = 0,10 \cdot d + 1,20. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации для этой зависимости равен 0,945.

Зависимости (6) и (7) при средней кажущейся плотности кусочков кокса, равной 1,14 г/см<sup>3</sup>, имеют следующий вид

$$S_{y\partial}^v = \frac{7,2}{d} + 0,62, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}; \quad (9)$$

$$S_{y\partial}^m = \frac{S_{y\partial}^v}{\rho} = \frac{6,31}{d} + 0,54, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}.$$

При всем многообразии сыпучих материалов и их гранулометрических составов в распределении отдельных кусочков по крупности наблюдается наличие единого закона. Достаточно полный обзор и анализ работ, в которых делались попытки описания ситового состава неоднородного сыпучего материала, дан в монографии [6]. Предложенные различные уравнения в какой-то мере удовлетворительно описывают эмпирические данные, но не вполне согласуются с теоретическими положениями, которые вскрывают сущность процесса образования частиц различной крупности.

Наиболее удачным и широко применяемым на практике является уравнение Розина и Раммлера.

Уравнение Розина и Раммлера по сути является функцией известного в математике распределения Вейбулла [7, 8], плотность распределения которого выражается уравнением

$$f(x) = \frac{m}{b} \cdot x^{m-1} \cdot \exp\left(-\frac{x^m}{b}\right). \quad (10)$$

Параметры  $m$  и  $b$  определяют вид кривой плотности распределения кусочков по крупности. Параметр  $m$  характеризует полидисперсность ситового состава, а параметр  $b$  масштабирует крупность материала.

Функция распределения Вейбулла, являющаяся интегральной к уравнению (10), имеет вид

$$F(d) = 1 - \exp\left(-\frac{d^m}{b}\right). \quad (11)$$

При описании ситового состава материала функция распределения Вейбулла показывает суммарный выход материала крупностью менее  $d$ .

Подставив в формулу (1) значения удельной поверхности  $S_{y\partial}^m$  и плотности распределения  $f(d)$  для кусочков агломерата и кокса в общем виде получим

$$S = \int_0^x \left( \frac{A}{x} + B \right) \cdot \frac{m}{b} \cdot x^{m-1} \cdot \exp\left(-\frac{x^m}{b}\right) \cdot d(x),$$

где  $x$  — переменное значение размера кусочка агломерата или кокса  $d$ , см.

После интегрирования и соответствующих преобразований для вычисления поверхности единицы массы материалов по их ситовому составу получим формулу (12)

$$S = \frac{A}{m-1} \left[ F(d) - d^{m-1} \cdot \{1 - F(d)\} \right] + B \cdot F(d). \quad (12)$$

Полученная формула (12) по определению является интегральной. Ее преимущество заключается в следующем.

При задании конкретного значения  $d$  рассчитывается удельная поверхность кусочков меньше заданного размера.

Расчет поверхности при любых двух значениях  $d$  позволяет оценить поверхность кусочков материала диапазона, ограниченного этими значениями  $d$ .

Наконец, при приближении функции  $F(d)$  к единице определяется удельная поверхность единицы массы материала в целом.

Как показано в работе [8], ситовый состав неоднородных по крупности материалов (полифракционных) однозначно характеризуется двумя величинами — средним размером частиц  $\bar{d}$  и коэффициентом вариации их размера  $\nu$ .

Средневзвешенная крупность материала  $\bar{d}$  связана с параметром  $b$  соотношением

$$\bar{d}^m = b \cdot \Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) = b \cdot \chi. \quad (13)$$

Тогда функция распределения Вейбулла запишется в следующем виде

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\chi \left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^m\right]. \quad (14)$$

Параметры  $m$  и  $\chi$  взаимосвязаны:  $\chi$  с помощью гамма-функции однозначно выражается через  $m$

$$\chi = \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]^m \approx \frac{0,43}{m} + 0,57. \quad (15)$$

Коэффициент вариации размера частиц также однозначно выражается через  $m$  с помощью гамма-функции

$$\nu = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/m)}{[\Gamma(1+1/m)]^2} - 1} \approx \frac{0,95}{m} + 0,05. \quad (16)$$

Для нахождения обобщенных характеристик ситового состава и параметров функции (1) рекомендуется проводить регрессионный анализ после двойного логарифмирования уравнения (12). При этом коэффициент регрессии даст значение параметра  $m$ , а свободный член уравнения регрессии  $c$  позволит определить средневзвешенный размер частиц по формуле

$$d = \exp\frac{\ln \chi - c}{m}. \quad (17)$$

Совокупность формул (14)–(17) позволяет по ситовому составу материалов определить удельную поверхность любой его массы по уравнению (12).

Набор этих же формул позволяет априори определить удельную поверхность массы материала по известным (заданным) обобщенным характеристикам ситового состава материала.

На основании опытных данных определения удельной поверхности и коэффициентов формы для кусочков агломерата и кокса различных фракций установлено, что с увеличением крупности кусочков агломерата и кокса их удельная поверхность уменьшается, а коэффициент формы уве-

личивается. Чем крупнее кусочки агломерата и кокса, тем их форма в большей степени отличается от сферической. Мелкие кусочки агломерата имеют форму, близкую к округленной, а по мере увеличения их размера — к угловатой. Кусочки кокса имеют угловатую форму.

Приведенная методика позволяет рассчитывать поверхность массы материала

по обобщенным характеристикам ситового состава агломерата и кокса.

В ходе дальнейших исследований целесообразно провести аналогичные исследования по определению поверхности остальных шихтовых материалов доменной плавки.

Необходимо также получить эмпирические зависимости, позволяющие упростить расчет.

### Библиографический список

1. Носенко, А. А. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов [Текст] / А. А. Носенко, С. И. Половнева // Изв. ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. — 2017. — Т. 7. — № 2. — С. 114–121.
2. Чушиев, В. Б. Математический метод определения зерновых характеристик сыпучих материалов [Текст] / В. Б. Чушиев // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2006. — Т. 8. — №4. — С. 1152–1152.
3. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным зернистым слоем [Текст] / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. — Л. : Химия. — 1968. — 512 с.
4. Расчеты аппаратов кипящего слоя [Текст] : справочник / под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. — Л. : Химия. — 1986. — 352 с.
5. ГОСТ 2160–2015. Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности [Текст]. — Введ. 2017–04–01. — М. : Стандартинформ, 2016. — 12 с.
6. Андреев, С. Е. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава [Текст] / С. Е. Андреев, В. В. Товаров, В. А. Перов. — М. : Металлургиздат. — 1959. — 437 с.
7. Кнотек, М. Анализ металлургических процессов методами математической статистики [Текст] / М. Кнотек, Р. Войта, И. Шефц ; пер. с чеш. — М. : Металлургия. — 1968. — 212 с.
8. Русаков, П. Г. Обобщенные характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала [Текст] / П. Г. Русаков, И. Ф. Русанов // Заводская лаборатория. — 1990. — № 2. — С. 68–69.

© Русанова Н. И.

© Русанов И. Ф.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н., зам. нач. ЦЛК Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.**

Статья поступила в редакцию 15.06.2021.

**PhD in Physics and Mathematics Rusanova N. I., PhD in Engineering Rusanov I. F. (DonSTI, Alchevsk, LPR, rusanova-2011@inbox.ru)**

### CALCULATION OF THE SURFACE OF POLYFRACTIVE SINTER AND COKE

*On the basis of experimental data, the coefficients of slump shape of individual fractions of sinter and coke were determined. Their dependence on the size of fraction is determined. A method for calculating the specific surface area of a polyfractive material based on the generalized characteristics of its sieve composition is developed.*

**Key words:** sinter, coke, specific surface area of sinter and coke pieces, generalized characteristics of sieve composition, average size of pieces, coefficient of variation of the size of pieces, specific surface of polyfractive material.