

DOI: 10.12737/22712

Трофимченко В.Н., аспирант,
Мордовская О.С., канд. техн. наук, доц.,
Ханин С.И., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАТОВ ЧАСТИЦ ГРУБОМОЛОТОГО МЕРГЕЛЯ И ПРОЦЕССА ИХ ДЕЗАГРЕГАЦИИ В СЕПАРАТОРЕ С УСТРОЙСТВОМ В ВИДЕ МНОГОЗАХОДНЫХ ЛЕНТ

trofimchenko@inbox.ru

Производству порошкообразных материалов сопутствует образование агрегатов частиц, что затрудняет процесс их сепарации. На примере грубомолотого мергеля с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения и лазерного анализатора размеров частиц выполнены исследования, позволившие установить размеры агрегирующих частиц, их формы, объемные распределения и характер контактов между частицами. На экспериментальной установке циркуляционного сепаратора с дезагрегирующим устройством в виде многозаходных лент, с использованием метода математического планирования экспериментов по плану ЦКОП 2⁴ проведены исследования изменения эффективности дезагрегации частиц от исследуемых факторов. Установлены области их рациональных значений.

Ключевые слова: порошкообразные материалы, сепарация, агрегаты частиц, дезагрегирующее устройство, эффективность дезагрегации.

Получение порошков с высокой удельной поверхностью методом помола затрудняется в связи с процессами агрегации тонкодисперсных и ультрадисперсных частиц. Технологический процесс производства порошкообразных материалов заданной дисперсности в промышленности строительных материалов основан на воздушной сепарации. Часть частиц кондиционных размеров, образуя агрегаты с более крупными частицами, отделяется в сепараторе от готового продукта и направляется на доизмельчение. Порошкообразный материал, находясь в контакте с газообразной средой, образует дисперсную систему твердая фаза – газообразная фаза [1]. Для такого типа дисперсных систем характерен непосредственный, точечный контакт частиц в составе агрегатов. Агрегацию такого рода принято называть «ближней» [2]. Силы взаимодействия частиц в составе агрегатов определяются поверхностными явлениями, характерными для дисперсной системы, и зависят от количества контактов и поверхности частиц [3,4]. На характер контактов частиц в агрегате значительное воздействие оказывает шероховатость поверхности частиц. Мелкие частицы преимущественно могут находиться между выступами более крупной частицы [5]. В работах Урьева Н.Б. критерием образования устойчивого контакта частиц (агрегата) является выполнение условия критического размера частиц, который зависит от сил взаимодействия и веса частиц [1, 6].

В производстве цемента в качестве основного сырьевого компонента часто используется склонный к агрегации тонкомолотый мергель.

Для изучения характера агрегации частиц с сырьевой мельницы ЗАО «Катавский цемент» была отобрана мергелевая мука, поступающая на элеватор. Исследование размеров частиц, их формы и характера контактов между ними выполнено на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU в центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова [7]. Определение объемного распределения агрегирующих частиц и их размеров выполнялось с использованием лазерного анализатора размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus, который дает возможность оценить количество агрегированного материала находящегося в сухой фазе [8]. Диапазон измерений анализатора имеет пределы от 0,01 мкм до 2000 мкм.

Отбор пробы молотого мергеля осуществлялся методом квартования. Рассевом на стандартных ситах (ГОСТ 6613-86) были отобраны следующие фракции для исследования на микроскопе: +125 мкм...–200 мкм; +200 мкм...–315 мкм; +315 мкм...–630 мкм [9]. При этом необходимо заметить, что агрегатов частиц в составе всех представленных фракций без увеличения не обнаружено.

На рисунке 1 представлен снимок частицы из фракции +125 мкм –200 мкм при разрешении 50 мкм. Она имеет незначительно вытянутую изометрическую форму и шероховатую поверхность. Ее размер, согласно шкале на снимке, имеет ширину 100 мкм и длину – 200 мкм. Края частицы не ровные, имеют выступы и впадины. Некоторые участки поверхности частицы вы-

глядят рыхлыми, похожими на скопление более мелких частиц. Агрегация при таком увеличе-

нии не наблюдается.

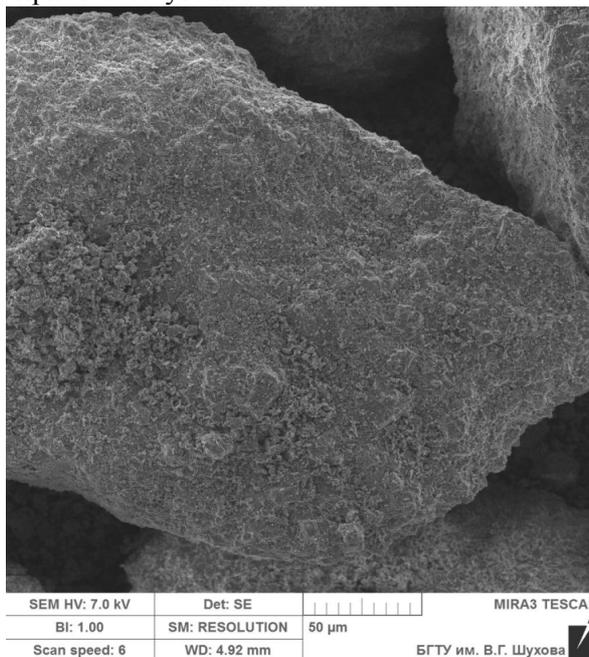


Рис. 1. Снимок частицы молотого мергеля (разрешение 50 мкм)

На снимке рисунка 2, а) с разрешением 10 мкм представлена поверхность частицы, снимок которой изображен на рисунке 1. В кадре снимка можно видеть, что на поверхности частицы находится большое количество частиц размером около 5 мкм и менее, которые практически сплошным слоем покрывают исследуемую поверхность. Форму наблюдаемых частиц можно охарактеризовать как изометрическую и в меньшей степени пластинчатую. Частицы кон-

тактируют с поверхностью крупной частицы, которую назовем «носителем» в силу ее более значительного размера по сравнению с расположенными на ее поверхности. Также на поверхности «носителя» заметны и непосредственные (точечные) контакты мелких частиц друг с другом. При этом поверхность выглядит более рыхлой и шероховатой, чем на снимке рисунка 1.

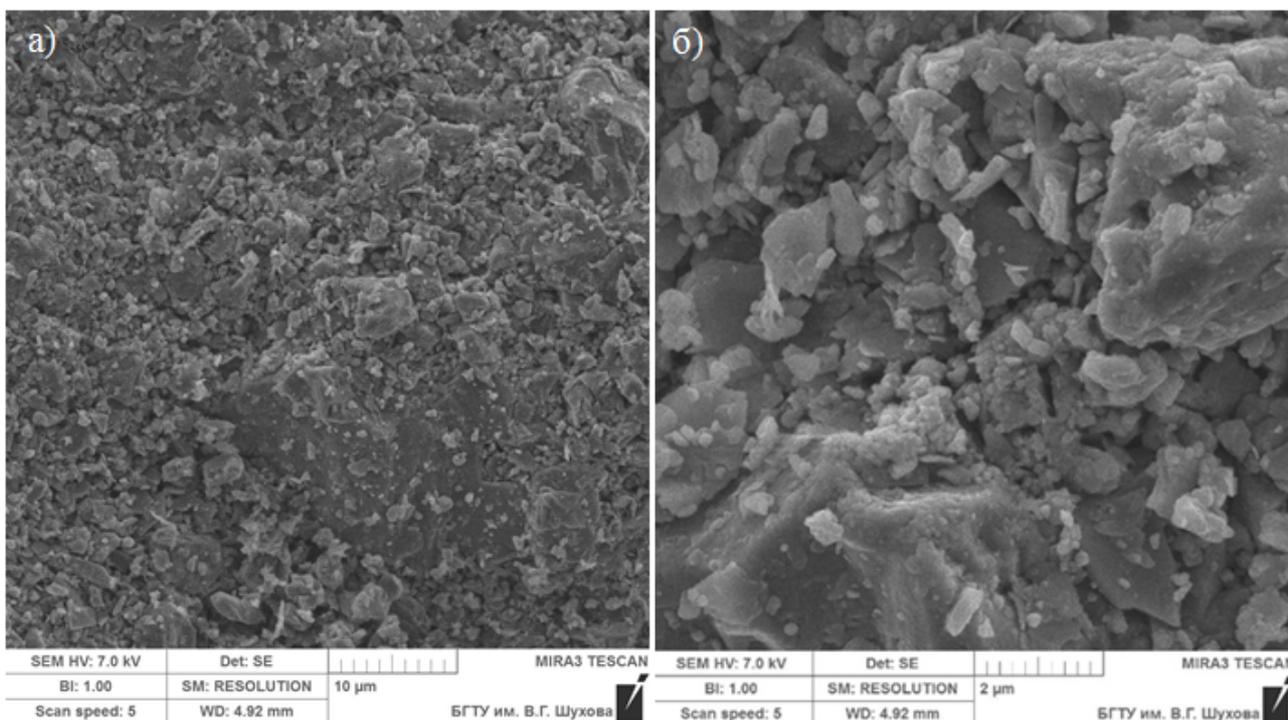


Рис.2. Снимок поверхности частицы а) разрешение 10 мкм и б) разрешение 2 мкм

На рисунке 2 б) представлен снимок той же поверхности при разрешении микроскопа 2 мкм. Такой снимок дает наиболее полное представление о характере контактов частиц в кадре и об их размерах. Становится заметно, что с «носителем» контактируют и частицы размером менее 1 мкм, которые также вступают контакт с более крупными частицами на поверхности «носителя». На поверхности «носителя» расположены контактирующие с ней как отдельные частицы, так и группы частиц, образующие объемные структуры. Большое количество частиц имеет изометрическую форму.

Представленные на рисунках 1 и 2 снимки дают представление о характере контактов частиц в составе агрегата, об их форме и размерах. Выполненные исследования частиц фракций +200...–315 мкм; +315...–630 мкм показали аналогичные характер контактов, расположения на их поверхностях агрегирующих частиц, их формы и размеры. Для установления с необходимой точностью объемной доли находящихся на поверхности «носителя» мелких частиц и входящих в состав агрегатов, был исследован гранулометрический состав частиц крупки исследуе-

мых фракций. С целью разрушения связей взаимодействия между агрегирующими частицами гранулометрический анализ выполнялся в дистиллированной воде [10]. В результате анализа были получены распределения частиц для трех фракций мергелевой муки: +125...–200 мкм, +200...–315 мкм, +315...–630 мкм. На рисунке 3 представлен результат гранулометрического распределения для грубомолотого мергеля фракции +200...–315 мкм. Характерной особенностью кривой распределения частиц является горизонтальный участок в диапазоне от 25 мкм до 135 мкм, означающий отсутствие частиц указанного диапазона. Расположение этого участка на уровне 16,7 % шкалы интегрального распределения показывает, какое интегральное значение составляют частицы размером менее 25 мкм. Причем частицы размером менее 5 мкм составляют 9,4 % в общем объеме, а размером до 11 мкм – уже 15 %. Сопоставив эти значения с результатами микроскопического исследования можно сделать вывод, что именно эти 15 % являются частицами, которые покрывают поверхность частицы «носителя».

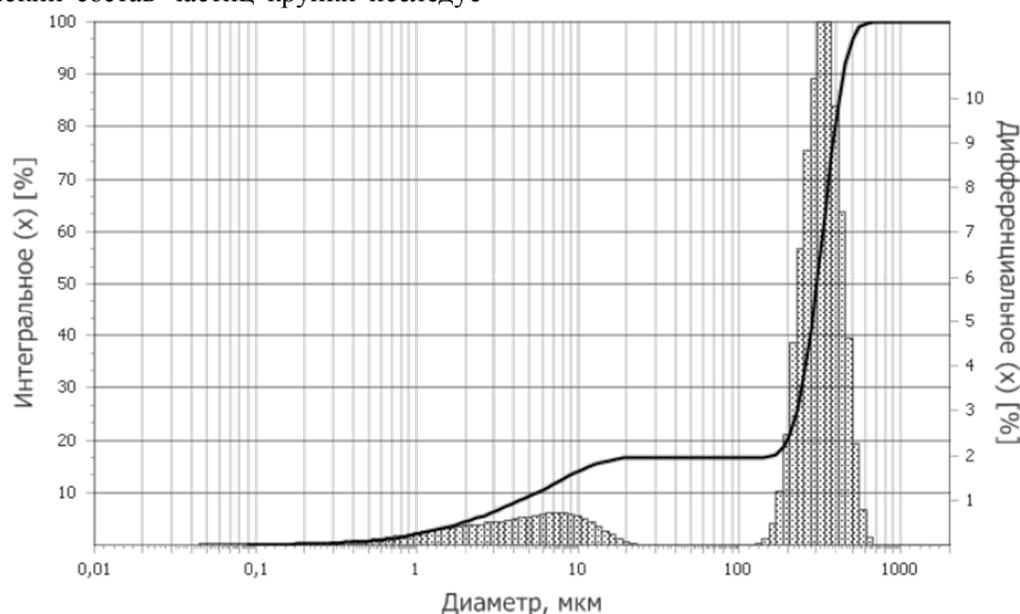


Рис. 3. Дисперсный состав молотого мергеля для фракции +200...–315 мкм

Распределение дисперсного состава частиц для фракции +125...–200 мкм показало, что участок горизонтальной части интегральной кривой лежит в диапазоне от 25 мкм до 95 мкм. Горизонтальный участок лежит на уровне 26,5 % шкалы интегрального распределения, причем из них 18,5 % занимают частицы до 5 мкм и 25 % частицы менее 11 мкм.

Результаты исследования дисперсного состава молотого мергеля фракции +315...–630 мкм свидетельствуют об отсутствии частиц размером от 25 мкм до 285 мкм. Горизонтальный участок интегральной кривой лежит на уровне

16,1 % шкалы интегрального распределения. При этом частицы менее 5 мкм занимают 9,8 % в интегральном исчислении, а частицы до 11 мкм занимают 14,5 %.

Сопоставление полученных в результате гранулометрического анализа трех фракций материала данных позволяют установить, что критический размер частиц, входящих в состав агрегатов и контактирующих с «носителем» не превышает 25 мкм. При этом частицы крупностью менее 5 мкм в объеме частиц размером менее 25 мкм для фракции +125...–200 мкм занимают 70 %, для фракции +200...–315 мкм –

56 %, а для фракции +315...–630 мкм – 61 %. Для фракции +125...–200 мкм характерна достаточно большая степень агрегации частиц (26,5 %).

По мнению авторов [11, 12] использование дезагрегирующих поверхностно активных веществ для порошков с большой удельной поверхностью является высоко затратным и не всегда применимым. Альтернативным способом дезагрегации частиц является применение специальных устройств, позволяющих разрушать связи между контактирующими частицами. С этой целью для циркуляционного сепаратора разработана эффективная конструкция дезагрегирующего устройства в виде многозаходных лент [13]. Для исследования работы сепаратора с этим устройством проведен эксперимент на физической модели сепаратора \varnothing 400 с использованием метода математического планирования экспериментов по плану ЦКОП 2⁴. Сепарацион-

$$\eta = -172,0409 + 103,8457 \cdot H/h + 7,0920 \cdot T/h + 1068,5433 \cdot B/D + 4,8215 \cdot \Omega - 0,0350 \cdot \Omega^2 - 841,7777 \cdot (H/h)^2 - 1,0544 \cdot (T/h)^2 - 14295,0000 \cdot (B/D)^2 + 0,3055 \cdot \Omega \cdot H/h - 0,0075 \cdot \Omega \cdot T/h + 0,7500 \cdot \Omega \cdot B/D + 5,0000 \cdot H/h \cdot T/h - 833,3333 \cdot H/h \cdot B/D + 3,7500 \cdot T/h \cdot B/D \quad (1)$$

С использованием уравнения (1) построены графические зависимости, характеризующие изменение η от рассматриваемых факторов (рисунк 4). При фиксированных значениях Ω и H/h варьирование факторами B/D и T/h в рассматриваемых диапазонах приводит к изменению эффективности сепарации в пределах от 21,4 % до 29,4 %. Поверхность функции параболическая, η достигает максимальных величин при значениях этих факторов, близких к центральной области факторного пространства. Рост эффективности дезагрегации при увеличении значения T/h до значений, близких к 3, обусловлен тем, что увеличение шага лент T обеспечивает близкое к лобовому взаимодействие агрегатов с поверхностью ленты устройства. Дальнейшее увеличение этого фактора приводит к изменению угла встречи агрегата с поверхностью ленты в сторону отклонения от перпендикулярности и уменьшает значение η . При увеличении соотношения B/D до значений, близких к центру плана наблюдается рост эффективности дезагрегации, обусловленный увеличением поверхностей, взаимодействующих с агрегатами частиц, так как увеличивается ширина лент B . Дальнейшее повышение значения этого фактора приводит к плавному снижению эффективности дезагрегации – происходит увеличение времени пребывания частиц на поверхности ленты при скатывании, при этом столкновение агрегатов и их разрушение при контакте с лентами происходит менее эффективно в результате демпфирования.

ная камера имеет высоту цилиндрической части $h = 0,11$ м; диаметр – $D = 0,315$ м. В качестве параметра оптимизации, характеризующего процесс сепарации в установке, выбрана эффективность дезагрегации η , %. За исследуемые факторы приняты угол наклона лент устройства относительно горизонтальной поверхности распределительного диска Ω , ($\Omega = 56 \dots 84^\circ$); отношение высоты установки устройства «Н» в сепарационной камере к высоте ее цилиндрической части h : H/h ($H/h = 0,027 \dots 0,155$); отношение шага винта лент устройства «Т» в сепарационной камере к высоте цилиндрической части сепарационной камеры: T/h ($T/h = 1,591 \dots 4,409$); отношение ширины лент устройства «В» в сепарационной камере к диаметру цилиндрической части сепарационной камеры D : B/D ($B/D = 0,019 \dots 0,044$). В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии в натуральном виде:

При фиксированных значениях Ω и T/h варьирование факторами B/D и H/h в рассматриваемых диапазонах приводит к изменению эффективности сепарации в пределах от 19,3 % до 29,8 % (рисунк 4, б). Максимального значения эффективности дезагрегации достигает при значениях факторов $H/h = 0,09$ и $B/D = 0,033$. При дальнейшем отклонении факторов B/D и H/h в стороны их уменьшения или увеличения наблюдается уменьшение значений функции. Минимальное значение η достигает при минимальном значении $B/D = 0,019$ и максимальном $H/h = 0,155$. Увеличение эффективности дезагрегации при возрастании значения фактора H/h связано с тем, что изменение высоты H положения дезагрегирующего устройства в сепарационной камере перемещает его в зону более интенсивного взаимодействия с агрегатами.

Варьирование факторами B/D и Ω в рассматриваемых диапазонах (при фиксированных значениях H/h и T/h) приводит к изменению эффективности сепарации в пределах от 16,8 % до 29,2 % (рисунк 4, в). Максимальное значение функция принимает при значениях $B/D = 0,035$ и $\Omega = 69$ град. Минимум функции η соответствует наименьшему значению фактора $B/D = 0,019$ и наибольшему $\Omega = 84^\circ$. Снижение эффективности дезагрегации происходит при изменении угла установки лент устройства от значения 69° . При этом значении Ω угол между вектором скорости агрегата и нормалью к поверхности ленты в точке их касания близок к 90° .

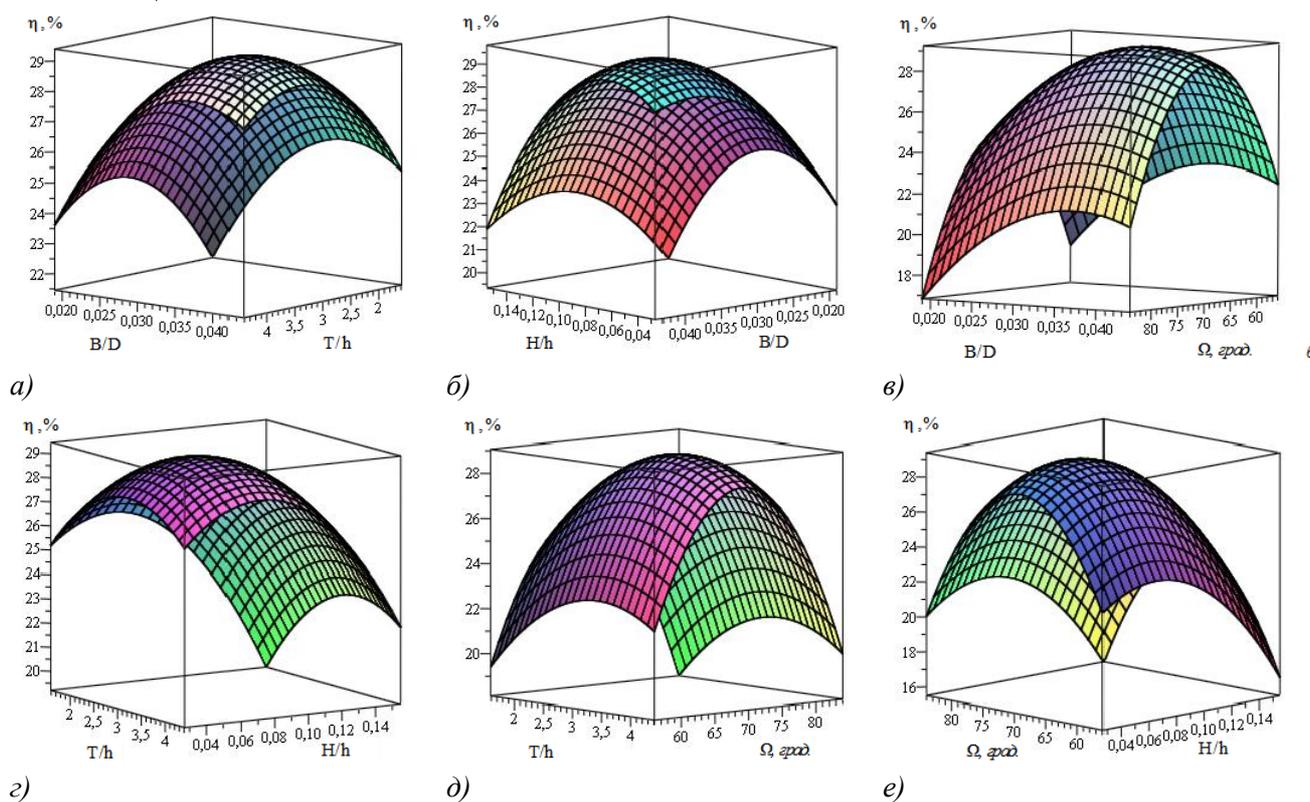


Рис. 4. Зависимости эффективности дезагрегации от исследуемых факторов:

а) от B/D и T/h при $\Omega = 70^\circ$, $H/h = 0,09$; б) от B/D и H/h при $T/h = 3$, $\Omega = 70^\circ$; в) от B/D и Ω при $H/h = 0,09$, $T/h = 3$;
 г) от H/h и T/h при $\Omega = 70^\circ$, $B/D = 0,032$; д) от Ω и T/h при $H/h = 0,091$, $B/D = 0,032$; е) от Ω и H/h при $T/h = 3$,
 $B/D = 0,032$

Варьирование факторами B/D и Ω в рассматриваемых диапазонах (при фиксированных значениях H/h и T/h) приводит к изменению эффективности сепарации в пределах от 19,2 % до 29,4 % (рисунок 4, в). Значение η достигает своего максимального значения при $T/h = 3,15$ и $H/h = 0,07$. Минимальное значение функция принимает при наименьшем значении T/h и максимальном H/h . Существенный рост эффективности дезагрегации происходит в результате уменьшения соотношения H/h до значения 0,07, при этом увеличение T/h до 3,15 также повышает эффективность дезагрегации. Значение η начинает плавно снижаться при изменении факторов H/h от 0,07 до 0,027 и T/h от 3,15 до 4,409. Процесс дезагрегации наиболее эффективен при $T/h = 3,15$.

Варьирование факторами T/h и Ω в рассматриваемых диапазонах (при фиксированных значениях H/h и B/D) приводит к изменению эффективности сепарации в пределах от 18,1 % до 29 % (рисунок 4, д). Наибольшего значения η достигает при $\Omega = 68^\circ$ и $T/h = 3,16$. Из графических зависимостей следует, что на эффективность дезагрегации изменение угла установки лент влияет в большей степени, чем изменение фактора T/h . Рост функции происходит при измене-

нии Ω от 56° до 68° и при увеличении T/h до значения 3,16. Далее происходит резкое снижение η при увеличении Ω до 84° градусов и плавное снижение при увеличении значения фактора T/h до 4,409. Угол установки лент оказывает значительное влияние на процесс взаимодействия дезагрегирующего устройства с агрегатами и на их разрушение, при этом шаг установки лент влияет на разрушение агрегатов в меньшей степени.

Варьирование факторами H/h и Ω в рассматриваемых диапазонах (при фиксированных значениях T/h и B/D) приводит к изменению эффективности сепарации в пределах от 15,6 % до 29,3 % (рисунок 4, е). Максимальное значение η принимает при угле установки лент 72 градуса и значении $H/h = 0,096$. Минимум функции достигается при максимальных H/h и Ω . Рост эффективности дезагрегации происходит при увеличении угла установки от 56° до 71° , затем наблюдается снижение η . Эффективность дезагрегации незначительно повышается при увеличении H/h с 0,027 до 0,096, при дальнейшем увеличении H/h эффективность дезагрегации резко уменьшается.

Таким образом, на основании микроскопического и гранулометрического анализа различных фракций молотого мергеля можно сделать

вывод, что форма контактирующих частиц в большинстве изометрическая; в составе агрегата имеет место непосредственный (точечный) контакт частиц; минимальная агрегация 16,1 % соответствует фракции +315...–630 мкм, максимальная агрегация (26,5 %) – фракции +125...–200 мкм. Максимальный (критический) размер частиц, контактирующих с частицей «носителем», для всех исследуемых фракций не превышает 25 мкм. Для фракций материала +125...–200 мкм и +315...–630 мкм частицы менее 5 мкм занимают соответственно 70 % и 61 % в объеме контактирующих частиц, крупность которых менее 25 мкм.

Исследования, проведенные с использованием метода математического планирования экспериментов на физической модели сепаратора \varnothing 400, оснащенного дезагрегирующим устройством в виде многозаходных лент, позволили установить эффективность применения устройства и области рациональных значений исследуемых факторов: угла наклона лент устройства относительно горизонтальной поверхности распределительного диска Ω ; отношение высоты установки устройства в сепарационной камере к высоте ее цилиндрической части – H/h ; отношение шага винта лент устройства в сепарационной камере к высоте цилиндрической части сепарационной камеры – T/h ; отношение ширины лент устройства в сепарационной камере к диаметру цилиндрической части сепарационной камеры – B/D . Их варьирование в области принятого факторного пространства изменяет эффективность дезагрегации в диапазоне $\eta = 15,6...29,8$ %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Урьев Н.Б. Структурированные дисперсные систем // Соросовский образовательный журнал. 1998. №6. С. 42–48

2. Зонтаг Г., Шьренге К. Коагуляция и устойчивость дисперсных систем. Л.: «Химия», 1973. 152 с.

3. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. М.: «Наука», 1978. 368 с.

4. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.

5. Зимон А.Д. Что такое адгезия. М.: Наука, 1983. 176 с.

6. Урьев Н.Б. Коллоидные цементные растворы. Л.: Стройиздат, 1980. 192 с.

7. Гаврилова Н. Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. 52 с.

8. Домкин К. И. Физические основы гранулометрического анализа частиц методом лазерной дифракции // НиКа. 2011. №. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/fizicheskie-osnovy-granulometricheskogo-analiza-chastits-metodom-lazernoy-difraktsii> (дата обращения: 09.10.2016).

9. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд. перераб. Л. Химия, 1987. 264 с.

10. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: «Наука», 1979. 384 с.

11. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979. 384 с.

12. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Изд-во «Химия», 1980. 320 с.

13. Трофимченко В.Н., Ханин С.И., Мордовская О.С. Совершенствование процесса классификации порошковых материалов в циркуляционном сепараторе // Механизация строительства. 2015. №8. С. 43–45.

Trofimchenko V.N., Mordovskaya O.S., Khanin S.I.

STUDY OF PARTICLE AGGREGATES COARSE-GRAINED MARL AND PROCESS OF DISAGGREGATION OF IT IN THE SEPARATOR WITH DEVICE AS MULTIPLE-BANDS

Production of powder materials is accompanied by the formation of aggregates of particles, which complicates the process of their separation. For example coarse-grained marl with high resolution scanning electronic microscope and laser particle size analyzer studies performed that allowed to establish the size of the particles aggregating, volume distribution, their shape and nature of contacts between particles. In the experimental setup of the circulation separator disaggregated device in the form of multiple-bands, using the method of mathematical experiment planning central composite orthogonal plan 2^4 studied the effects on particle disaggregation of factors studied. The regions of their rational values have been defined.

Key words: powdered materials, a separator, particle aggregates, disaggregating device, efficiency of disaggregation process.

Трофимченко Владимир Николаевич, аспирант.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: trofimchenko@inbox.ru

Ханин Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: dh@intbel.ru

Мордовская Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, профессор.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: dh@intbel.ru