

**М.Ю. Субботин****ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННЫХ СУШИЛОК ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Интенсивность термической сушки дисперсных материалов в барабанных сушилках напрямую зависит от эффективности конвективного теплообмена. Конвективный обмен в свою очередь зависит от полноты и равномерности заполнения объема барабана падающим влажным материалом. Для обеспечения максимально эффективного теплообмена внутренние устройства сушильного барабана должны учитывать механические свойства материала, подлежащего сушке. Конструирование таких устройств требует комплексного анализа механических свойств влажных сыпучих материалов. Необходимо выяснить, от чего зависят и как меняются на протяжении сушки свойства влажного материала, которые влияют на конструкцию внутренних устройств сушильного барабана. Изложены результаты исследования зависимости сыпучести дисперсного материала от его влажности, гранулометрического состава, гидрофильности и температуры. Также изложены перспективы применения результатов данной исследовательской работы в проектировании внутренних устройств барабанных сушилок.*

*Ключевые слова: сушка, конвективный теплообмен, интенсификация, сыпучий материал, угол естественного откоса, влажность, зависимость.*

**Б**арабанные сушилки нашли широкое применение при обогащении полезных ископаемых и в других отраслях промышленности для термической сушки. Это обусловлено тем, что термическая сушка это зачастую единственный способ достичь товарной влажности конечной продукции. По причине высокой стоимости и технической сложности радиометрические, инфракрасные, распылительные, вакуумно-импульсные и вакуумные сушилки не нашли широкого применения в обогащении полезных ископаемых [1].

Обзор сушильных отделений на работающих фабриках и библиографический поиск показали, что в настоящее время весьма актуальной проблемой барабанных сушилок является неэффективный конвективный теплообмен между сушильным агентом и высушиваемым материалом [2]. Причиной этого является в первую очередь недостаточно полное использование

поперечного сечения барабана. При возникновении в сечении барабана зоны, не закрытой завесой падающего материала резко снижается количество теплового агента, проходящего через высушиваемый материал.

Обеспечить равномерное распределение сыпучего материала по сечению барабана должны его внутренние устройства. Но большинство разработанных конструкций являются весьма металлоемкими и сложными в изготовлении [3] вследствие того, что ставится цель разработать универсальную насадку сушильного барабана, одинаково хорошо справляющуюся со своей задачей при сушке любого материала.

Из вышеизложенного следует, что задачей в области термической сушки сыпучих материалов в настоящий момент является повышение эффективности конвективного теплообмена в барабанных сушилках путем конст-

руирования внутренних устройств с учетом физико-механических свойств отдельно взятых сыпучих материалов.

Основным параметром дисперсного материала, который следует учитывать при конструировании внутренних устройств, является его сыпучесть, которая наиболее показательно отражается углом естественного откоса. Это максимально возможный угол  $\varphi$  между склоном массива сыпучего материала и горизонтальной плоскостью [4].

Различают статический и динамический угол естественного откоса. Под статическим понимается угол естественного откоса, образованный при разрушении слоя сыпучего материала после удаления подпорной стенки. Под динамическим понимается угол естественного откоса, образованный при отсыпке дисперсного материала на плоскость. Очевидно, что для конструирования внутренних устройств сушильного барабана необходимо точно определить, какой именно угол естественного откоса образуется на лопатках сушилки. Но ответить на этот вопрос однозначно сразу не представляется возможным, так не происходит отсыпки материала на лопатку, также нет и факта удаления подпорной стенки.

Кроме того, нужно учитывать, что величина угла естественного откоса влажного сыпучего материала отличается от угла естественного откоса того же материала в воздушно-сухом состоянии [5].

Следовательно, для точного учета физико-механических свойств сыпучего материала в конструкции внутренних устройств сушилки необходимо:

- определить принадлежность угла естественного откоса сыпучего материала, образуемого на лопатках сушильного барабана, к статическому или динамическому;

- изучить зависимость угла естественного откоса сыпучего материала от его влажности;

- определить динамику убыли массы жидкости в сыпучем материале на протяжении сушки (изучить кинетику сушки данного сыпучего материала).

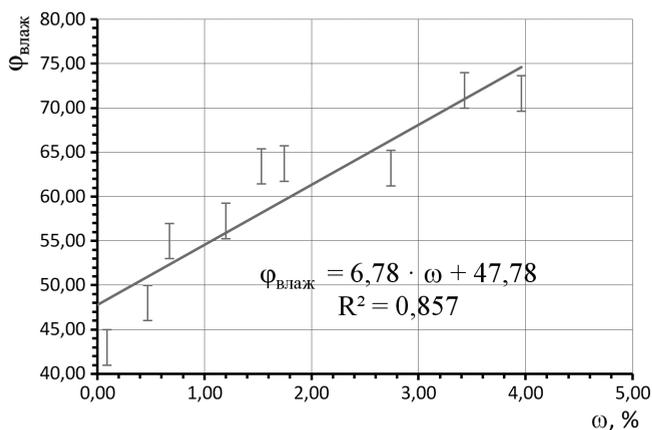
Для экспериментальных исследований были подготовлены сыпучие минеральные пробы: исходной руды и концентрата Ново-Широкинского рудника, слюдяной и полевошпатовый концентраты Мальшевской обогатительной фабрики, концентрат Кличкинской обогатительной фабрики, гравитационный концентрат руды месторождения Гардунайское.

В предыдущих печатных работах, опубликованных по данной теме описана серия экспериментов, результатом которой стало доказательство того, что угол естественного откоса, на лопатках барабанной сушилки, является статическим [6].

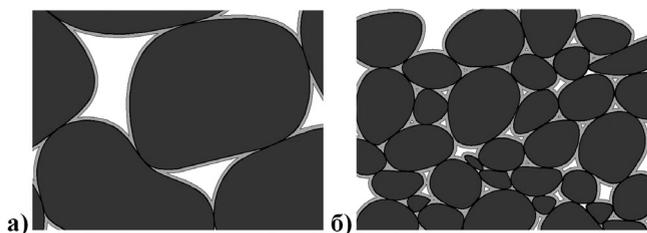
Для изыскания зависимостей статических углов естественного откоса сыпучих материалов от их влажностей проведена вторая серия экспериментов. Пробы, подготовленные для исследований замачивались до появления свободной влаги над поверхностью материала, после чего проводилась их сушка в сушильном шкафу при температуре 120 °С. Периодически производилось перемешивание проб для равномерного распределения влаги в материале и последующий замер статического угла естественного откоса каждой пробы. После каждого замера угла естественного откоса часть пробы, отбиралась для определения ее влажности. Полученные данные обрабатывались на ЭВМ с получением частных зависимостей. Было получено 23 зависимости, каждая из которых подчиняется линейной функции

$$\varphi_{\text{влаж}} = B \cdot \omega + \varphi_{\text{сух}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{влаж}}$  – статический угол естественного откоса влажного сыпучего материала, град;  $\omega$  – влажность ис-



**Рис. 1. Зависимость статического угла естественного откоса от влажности для свинцового концентрата месторождения «Ново-Широкинское» при температуре окружающего воздуха 22 °С**



**Рис. 2. Относительно крупные а) и мелкие б) частицы, покрытые слоем капиллярно связанной влаги**

пытуемого сыпучего материала, %;  $\varphi_{\text{вн.тр.}}$  – статический угол естественного откоса воздушно-сухого сыпучего материала, град;  $B$  – коэффициент, отражающий зависимость угла естественного откоса сыпучего материала от его влажности и устанавливаемый опытным путем для каждого сыпучего материала.

Пример графического отображения полученных зависимостей представлен на рис. 1.

Дальнейшая экспериментальная работа заключалась в определении факторов, влияющих на значение коэффициента  $B$  (1), характеризующего зависимость величины угла естественного откоса сыпучего материала от его влажности.

В первую очередь следует заметить, что наличие капиллярных сил

в массиве сыпучего материала возможно лишь при покрытии поверхности частиц капиллярно связанной влагой. Следовательно увеличение суммарной поверхности частиц приведет к увеличению количества влаги, необходимой для ее смачивания (рис. 2).

Во вторых, интенсивность действия капиллярных сил в массиве сыпучего материала находится в прямой зависимости от гидрофильности его частиц. Кроме того, установлено, что при повышении температуры влажного сыпучего материала повышается и значение его угла естественного откоса. Это объясняется увеличением количества энергии межмолекулярного взаимодействия на границе раздела фаз газ/жидкость/твердая фаза.

При этом плотность частиц существенного влияния на интенсивность действия капиллярных сил не оказывает, так как капиллярные явления в полной мере проявляются в условиях, когда размеры частиц настолько малы, что роль их веса становится незначительной.

Итак, теоретически установлено, что величина коэффициента  $B$  зависит от среднего размера, гидрофильности и температуры частиц сыпучего материала.

Для экспериментальной проверки данного утверждения проведены исследования для краевого угла смачивания, плотности и гранулометрического состава проб.

Для гранулометрического анализа выбрано два метода: ситовой анализ и лазерная дифракция. Лазерная дифракция применена для класса

-0,106 мм, а для классов +0,106 мм применен ситовой анализ. Данные гранулометрического анализа обработаны статистическим методом для установления значения средневзвешенного диаметра частицы для каждой пробы.

Для нахождения кажущейся плотности (масса единицы объема твердой фазы без вычета объема внутренних пустот) использован пикнометрический метод.

Измерения краевого угла смачивания проводились путем фотографирования пузырьков газа под водой и капель жидкости на поверхности сыпучих материалов. Полученные фотографии обрабатывались на ПК с помощью векторной САПР для определения краевого угла смачивания.

Массив полученных данных был обработан при помощи математического анализа с целью изыскания зависимости величины коэффициента  $B$  от гидрофильности частиц, их средневзвешенного размера и температуры окружающей среды.

Согласно полученной зависимости, значение коэффициента  $B$  подчиняется вышеуказанным параметрам согласно следующему уравнению:

$$B = -4,5 \cdot \frac{T^{(0,1 \cdot D)}}{1000} + T \cdot 0,77 \left( \frac{T}{100} - \frac{T}{50} \right) + 10 \quad (2)$$

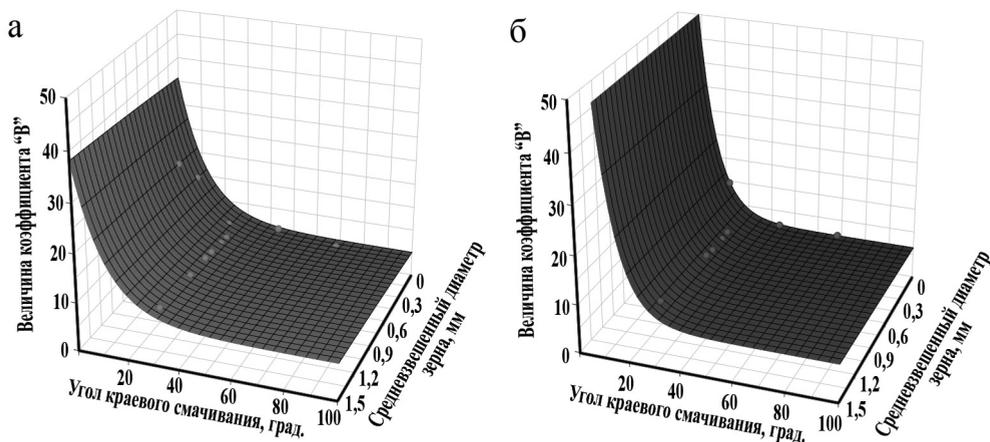
где  $B$  – коэффициент, отражающий зависимость угла естественного откоса сыпучего материала от его влажности и устанавливаемый опытным путем для каждого сыпучего материала;  $D$  – размер средневзвешенного зерна, мм;  $\theta$  – краевой угол смачивания сыпучего материала, град.;  $T$  – температура окружающего воздуха или теплового агента, °С.

Коэффициент корреляции составил 0,89.

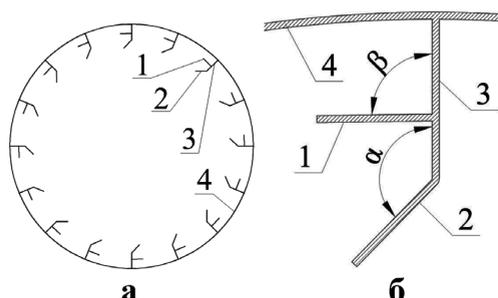
Графическое отображение данной функции для температур окружающего воздуха 22 °С и 100 °С в виде поверхностей представлено на рис. 3.

Данная функция позволяет определить коэффициент  $B$ , зная лишь гранулометрический состав пробы и ее угол краевого смачивания, не прибегая к проведению значительного объема экспериментальных работ.

В соответствии с полученными результатами научно-исследовательской работы были усовершенствованы внутренние устройства сушильного



**Рис. 3. Зависимость величины коэффициента  $B$  от размера средневзвешенного зерна и краевого угла смачивания сыпучего материала для температуры окружающего воздуха 22 °С (а) и 100 °С (б)**



**Рис. 4. Выбор угла наклона лопаток к основанию (лопасти):** а) поперечное сечение сушильного барабана; б) увеличенное изображение одной лопасти; 1 – лопатки наружного круга; 2 – лопатки внутреннего круга; 3 – лопасти; 4 – корпус барабана

барабана, описанные в патенте Храмова А.Н. [7]. В настоящее время подана заявка на предполагаемое изобретение.

Конструкция данного набора внутренних устройств сушильного барабана представлена на рис. 4.

Угол наклона лопаток 1 к основанию лопастей 3 равен

$$\beta = \varphi_{\text{сух}} + 45 + \omega \cdot B, \text{ град}; \quad (3)$$

угол наклона лопаток 2 к лопастям 3 равен

$$\alpha = \varphi_{\text{сух}} + 90 + \omega \cdot B, \text{ град}, \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) выведены на основании уравнения (1) с поправкой на поворот барабана. При этом угол наклона лопаток по длине барабана подбирается в соответствии меняю-

щейся на протяжении сушки влажностью материала.

Результатом выполнения данной научно-исследовательской работы стало решение актуальной научно-технической задачи: изыскание способа интенсификации термической сушки сыпучих материалов в барабанных сушилках, реализуемого при минимальных затратах на реконструкцию сушилок и корректировку технологических режимов.

Полученные данные позволяют проектировать внутренние насадки промышленных барабанных сушилок с учетом статического угла естественного откоса высушиваемого материала и его изменением на протяжении сушки с целью максимально полного использования внутреннего объема барабана. При этом результаты исследований позволяют при проектировании внутренних устройств сушильного барабана избежать значительного количества экспериментальных исследований подлежащего сушке сыпучего материала.

Реконструкция лопаток барабанной сушилки в соответствии с изложенным материалом позволит снизить температуру сушильного агента за счет более эффективного теплообмена между агентом и высушиваемым материалом, снизить температуру отходящих газов, износ уплотнений барабана, а также унос материала за счет снижения скорости сушильного агента (топочных газов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин М.Ю. Изучение сыпучих свойств рудных концентратов с целью интенсификации их термической сушки / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения 2013); Материалы Международного совещания. Томск, 16–19 сентября 2013 г. – Томск: ППУ, 2013. – С. 369–371.

2. Храмов А.Н. Интенсификация процесса сушки флотационных флюоритовых концентратов за счет реконструкции насадки

барабанной сушилки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – ОВ 3. Забайкалье. – 2009. – С. 290–294.

3. Антипов С.Т., Валуйский В.Я., Меснянкин В.Н., Шахов С.В. Патент 2204772 Российская Федерация, Барабанная сушилка с периферийной лопастной насадкой; патентообладатель: Воронежская государственная технологическая академия. – № 2001133555/06, заявл. 10.12.2001; опубл. 20.05.2003.

4. Сила трения скольжения [Электронный ресурс] / дизайн и разработ. Creative Commons Attribution-ShareAlike. – Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Сила\\_трения\\_скольжения](http://ru.wikipedia.org/wiki/Сила_трения_скольжения). – Загл. с. экрана.

5. Гагапова Н.Ц., Коновалов В.И., Колиух А.Н., Пахомов А.Н. О температурных площадках при низкой высокотемпературной кондуктивно-барабанной сушке влажных материалов // Вестник тамбовского государственного технического университета. – 2004. – Т. 10. – № 4–1. – С. 968–977.

6. Субботин М.Ю. Влияние зависимости угла естественного откоса сыпучего материала от его влажности на конструкцию сушиль-

ных аппаратов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2013. – № 1 (92). – С. 39–45.

7. Храмов А.Н. Патент 2444686 Российская Федерация, Барабанная сушилка; патентообладатель: Забайкальский государственный университет. – № 2010128841/06, заявл. 12.07.2010; опубл. 10.03.2012.

8. Алтухов А.В., Балабеков О.С., Сапрыкин А.В. Исследование эффективности насадки с Г-образным профилем барабанных сушильных агрегатов // Наука и образование Южного Казахстана. Серия: Процессы и аппараты химической технологии. – 1996. – № 3. – С. 277–278. **ПЛАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

---

Субботин Михаил Юрьевич – инженер, e-mail: barlog88@mail.ru, Забайкальский государственный университет.

---

UDC 66.047.75

## SUBSTANTIATION OF DRUM DRYERS DESIGN BY PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF BULK MATERIALS

Subbotin M. Yu., Engineer, e-mail: barlog88@mail.ru, Transbaikal State University, e-mail: mail@zabgu.ru.

---

*Intensity of bulk materials thermal drying in drum dryers directly depends on convective heat exchange efficiency. The convective exchange in turn depends on completeness and uniformity of filling of volume of a drum by the falling damp material. For ensuring the most effective heat exchange internal devices of a dryer drum have to correspond to mechanical properties of the material which is subject to drying. Designing of such devices demands the complex analysis of mechanical properties of bulk materials. It is necessary to investigate the factors influencing mechanical properties of bulk materials. It is also necessary to research, how these bulk material properties change throughout drying. Results of research of dependence of bulk material flowability from his humidity, particle size distribution, hydrophilicity and temperature are given in article. Prospects of application of this research results in design of internal devices of drum dryers are also given.*

*Key words: drying, convective heat transfer, intensification, bulk material, angle of natural slope, humidity, dependence.*

## REFERENCES

1. Subbotin M. Yu. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoi i glubokoi pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plak-sinskie chteniya 2013): Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya. Tomsk, 16–19 sentyabrya 2013* (Innovative processes of complex and deep mineral raw materials processing (Readings of Plaksins 2013): Materials of the International meeting. Tomsk, 16–19 september 2013), Tomsk, TPU, 2013, pp. 369–371.

2. Khramov A. N. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2009, special issue 3 Zabaikal'e (Transbaikalia), pp. 290–294.

3. Antipov S. T., Valuiskii V. Ya., Mesnyankin V. N., Shakhov S. V. *Patent RU2204772*, 20.05.2003.

4. Сила трения скольжения (Sliding friction force), design and development: Creative Commons Attribution-ShareAlike, available at: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Сила\\_трения\\_скольжения](http://ru.wikipedia.org/wiki/Сила_трения_скольжения). The title from the screen.

5. Gatapova N. Ts., Konovalov V. I., Koliukh A. N., Pakhomov A. N. *Vestnik tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 10, no 4–1, pp. 968–977.

6. Subbotin M. Yu. *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no 1 (92), pp. 39–45.

7. Khramov A. N. *Patent RU2444686*, 10.03.2012.

8. Altukhov A. V., Balabekov O. S., Saprykin A. V. *Nauka i obrazovanie Yuzhnogo Kazakhstana. Seriya: Protssy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* (Series: Processes and devices of chemical technology), 1996, no 3, pp. 277–278.