
ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 4, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.4.08
УДК 539.3

Д.В. Лобовиков¹, А.В. Харченко², Е.В. Матыгуллина¹, Н.А. Колчанов¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия;
²Конструктив-СП, Пермь, Россия

**ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ГРАНУЛИРОВАНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ
В ПЛАНЕТАРНОМ ГРАНУЛЯТОРЕ**

Проведено исследование процесса гранулирования частиц каменного угля в планетарном грануляторе. Целью работы является определение возможности гранулирования измельченного каменного угля, исследование влияния параметров гранулирования (гранулометрический состав, доля жидкого связующего, планетарная и относительная скорость вращения) на примере угля на эффективность получения гранул, определение этапов гранулообразования. Для определения гранулометрического состава использовался ситовой анализ. Поверхность агломератов и гранул изучали с помощью оптической микроскопии. Установлено, что возможны два различных способа получения гранул угля. В первом способе в качестве исходного материала используются частицы угля, измельченные до требуемого размера гранул. Частицы шлифуются в планетарном грануляторе без добавления жидкости. Полученные гранулы имеют форму осколков со скругленными ребрами и вершинами, а также гладкими уплотненными гранями, прочность гранул равна прочности исходного материала, поверхность не подвержена разрушению от трения, пылению, так как уплотнена. Во втором способе используются частицы фракции менее 1,25 мкм, добавляется вода в качестве связующего, происходит процесс окатывания с образованием гранул. При гранулировании обнаружено образование пластин на торцевых стенках барабана, состоящих из пыли, полученной в результате шлифования крупных частиц. Измерение размеров частиц под оптическим микроскопом показало, что максимальный размер частиц в составе пластин - 1,25 мкм. Исследование гранулометрического состава пластины с торцевой поверхности барабана является новым способом определения требуемого размера частиц исходного материала для гранулирования окатыванием.

Ключевые слова: гранулятор, планетарный, контакт, влажность, гранула, вращение, гранулометрический, фракция, гранулированный, сыпучий, жидкость, уголь.

D.V. Lobovikov¹, A.V. Kharchenko², E.V. Matygullina¹, N.A. Kolchanov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
²Konstruktiv-SP, Perm, Russian Federation

**STUDY OF THE MECHANISM OF COAL GRANULATION
IN PLANETARY GRANULATOR**

A study of the process of granulation of coal particles in a planetary granulator has been carried out. The aim of the work is to determine the possibility of granulation of crushed coal, to study the effect of granulation parameters (particle size distribution, the proportion of liquid binder, planetary and relative rotation speed) on the example of coal on the efficiency of obtaining granules, to determine the stages of granulation. Sieve analysis was used to determine the particle size distribution. The surface of the agglomerates and granules was studied using optical microscopy. It has been established that there are two different ways to obtain coal granules. In the first method, coal particles, crushed to the required granule size, are used as a starting material. The particles are ground in a planetary granulator without adding liquid. The resulting granules are in the form of fragments with rounded edges and tops, as well as smooth compacted edges, the strength of the granules is equal to the strength of the initial material, the surface is not subject to destruction from friction, dusting, since it is compacted. In the second method, particles with a fraction of less than 1.25 microns are used, water is added as a binder, and the process of rolling with the formation of granules occurs. During granulation, the formation of plates on the end walls of the drum was found, consisting of dust obtained as a result of grinding large particles. Measurement of the particle size under an optical microscope showed that the maximum particle size in the composition of the plates is 1.25 microns. The study of the particle size distribution of the plate from the end surface of the drum is a new way to determine the required particle size of the starting material for granulation by rolling.

Keywords: granulator, planetary, contact, moisture, granule, rotation, granulometric, fraction, granular, free-flowing, liquid, coal.

Введение

Гранулирование применяется с целью получения требуемого гранулометрического состава материала и формы гранул, в результате обеспечивается требуемая текучесть сыпучего материала, прочность гранул, пористость [1–9]. Гранулирование в планетарном грануляторе (рис. 1) [10–12] позволяет достичь на два порядка более высоких значений скорости соударения частиц и давления по сравнению с гранулятором барабанного типа со стационарной осью. В настоящее время нет четких критериев гранулируемости материалов в планетарном грануляторе. Предполагается, что гранулируемость зависит от фракционного состава сыпучего материала, прочности единичного точечного контакта частиц, смачиваемости материала связующей жидкостью, вязкости жидкости. В настоящей работе в качестве материала для гранулирования выбран непластичный материал – каменный уголь.

Целью работы является определение возможности гранулирования измельченного каменного угля, исследование влияния параметров гранулирования (фракционный состав, доля жидкого связующего) на эффективность получения гранул; определение этапов гранулообразования.

В данной работе проверяется гипотеза о том, что возможно гранулирование в планетарном грануляторе частиц любого твердого (не пластичного) материала при уменьшении размеров частиц материала до определенного уровня и достижения необходимого давления в сыпучем материале.

Выявление возможности гранулируемости каменного угля

Предварительно гранулировался дробленый каменный уголь с частотой планетарной и относительной скорости вращения 120 об/мин, лишь в 3 раза превышающей предельную частоту вращения барабанного гранулятора с неподвижной осью барабана. В качестве связующей жидкости использовалась вода (10 об. %). Экспериментально показана возможность образования гранул каменного угля на таком режиме. Полученные гранулы (рис. 2) имеют незначительную прочность. Дальнейшие исследования направлены на то, чтобы изучить влияние параметров гранулирования на примере угля на эффективность гранулообразования и прочность полученных гранул.

Физические свойства используемого каменного угля:

- прочность: 20 МПа;
- плотность насыпная: 0,9 г/см³;
- коэффициент трения: 0,25–0,35;

– краевой угол смачивания водой: 120°.

Для определения влияния фракционного состава на процесс гранулирования предварительно измельченный уголь рассеивали на три фракции:

- крупная фракция (№ 1): >0,32 мм;
- средняя фракция (№ 2): 0,2–0,32 мм;
- мелкая фракция (№ 3): <0,2 мм;
- пыль: <0,05 мм.

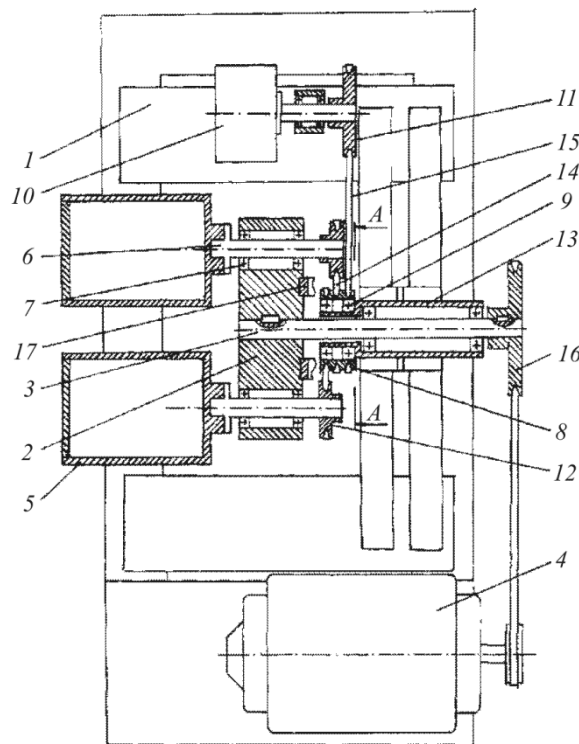


Рис. 1. Схема планетарного гранулятора: 1 – рама; 2 – вило; 3 – основной вал; 4 – электродвигатель; 5 – формующий барабан; 6 – вал барабана; 7 – подшипники вала барабана; 8 – регулирующий вращение барабанов шкив; 9 – подшипники; 10 – тормозной механизм; 11 – шкив тормозного механизма; 12 – шкив барабана; 13 – корпус основного вала; 14 – ремень привода барабана; 15 – ремень тормозного механизма; 16 – шкив привода основного вала; 17 – стойка натяжителя ремня привода барабана

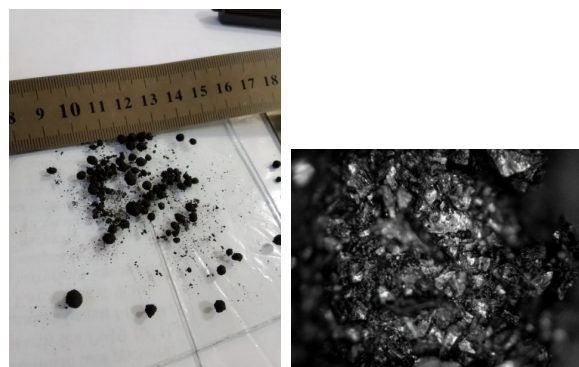


Рис. 2. Гранулы угля $\times 50$, полученные при следующих параметрах: планетарная скорость – 120 об/мин; относительная скорость – 120 об/мин; t – 15 мин; вода – 10 об. %

Проведены две серии экспериментов по гранулированию каменного угля. Каждая серия состоит из последовательных экспериментов, при этом в каждом последующем эксперименте используется материал из предыдущего. Относительная частота вращения рабочего барабана гранулятора направлена в обратную сторону относительно планетарной [13–15].

В первой серии использовались частицы фракций № 1 и № 2 (рис. 3) в соотношении 2:1. Исходный материал получен дроблением каменного угля ударным способом и в шнековой мельнице. Получены частицы осколочной формы. В первом эксперименте продолжительностью 6 мин вода в качестве связующего не использовалась. Такие условия были выбраны с целью шлифования крупных частиц в результате интенсивного перемешивания сыпучего материала в планетарном грануляторе с образованием мелкой фракции. Планировалось, что после образования достаточного количества мелкой фракции процесс гранулирования будет инициирован. В последующих экспериментах добавлялась вода в качестве связующего.

Как и ожидалось, в результате шлифования крупных фракций появилась мелкая фракция № 3 (рис. 4–6), однако после 50 мин гранулирования ее объем составил лишь 10 % (рис. 7). Частицы фракции № 2 в результате шлифования уменьшились и перешли во фракцию № 3.

Поверхность крупных частиц фракции № 1, № 2 отполировалась, сгладилась, ребра и вершины скруглились, в результате вероятность присоединения частиц мелкой фракции № 3 и пыли уменьшилась.

После 36 мин гранулирования были обнаружены только две гранулы размером 2 мм (рис. 8), состоящие из фракции № 3 и пыли, заполнившей поры между частицами. Малое количество гранул получено по причине недостаточного количества фракции № 3 и пыли для заполнения всего объема пор между упаковкой крупных фракций № 1, № 2.

На фотографиях (рис. 9) видно, что из пыли на торцевых поверхностях барабана образовался плотный слой порошка в виде пластины. Выявлено, что в планетарном грануляторе первоначально идет только процесс шлифования частиц с образованием обломков и пыли, средний размер каждой фракции частиц уменьшается. В определенный момент частицы мелкой фракции уменьшаются настолько, что их смачивание приводит к образованию агломератов в виде пластин, прикрепленных к торцам барабана.

Анализ полученных результатов в первой серии экспериментов позволяет сделать следующие выводы.

Гранулирование угля, содержащего фракцию № 1, позволяет отшлифовать поверхность и скруглить ребра, вершины и углы частиц этой фракции. Скорости соударения в планетарном грануляторе при планетарной и относительной частоте вращения 600 об/мин, диаметре барабана 0,14 м, планетарном радиусе 0,1 м достигают 10 м/с. В результате ударных взаимодействий при высоких скоростях вращения гранулятора поверхность частиц уплотняется. При этом частицы не разрушаются и теряют не более 10 % своей массы. Таким образом, для получения гранул заданного размера и достаточной текучести можно использовать планетарный гранулятор без добавления жидкости. Полученные гранулы имеют форму осколков, но со скругленными ребрами и вершинами, а также гладкими уплотненными гранями (рис. 10). Прочность гранул равна прочности исходного материала, поверхность не подвержена разрушению от трения, пылению, так как уплотнена, уплотненная поверхность препятствует прикреплению других гранул, слеживанию сыпучего материала. При дальнейшем использовании отшлифованных гранул следует очистить их от пыли. В данном случае в планетарном грануляторе преобладает процесс шлифования, окатывание с образованием агломератов в виде гранул практически отсутствует.

Во второй серии экспериментов использовались частицы только мелкой фракции № 3, с добавлением воды от 10 до 15 об. % в качестве связующего в каждом последовательном эксперименте (рис. 11).

Получены следующие результаты. В грануляторе формируется, как и в серии № 1, плотная пластина на торцевой поверхности барабана (рис. 12). Структура более ровная (рис. 13), прочность выше, чем в серии № 1. Чем меньше размер частиц, тем более плотной является упаковка материала, увеличивается количество контактов на единицу объема, растет прочность агломератов. Определение размеров частиц с помощью оптической микроскопии показало, что их максимальный размер в составе пластин составляет 1,25 мкм, при том, что максимальный размер частиц в исходном порошке – 200 мкм. Исследование гранулометрического состава пластины с торцевой поверхности барабана является новым способом, позволяющим определить предельный размер частиц, при котором возможна их агломерация, а также оптимальный гранулометрический состав исходного материала для гранулирования окатыванием. Преимущество этого способа заключается в том, что проводится один эксперимент до момента образования пластины на торцевой поверхности барабана.

Серия экспериментов № 1

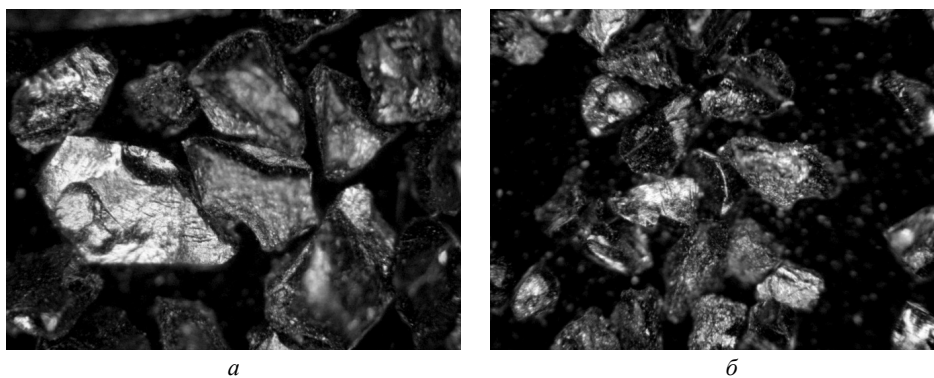


Рис. 3. Исходный порошок каменного угля, $\times 50$: *a* – фракция № 1; *б* – фракция № 2

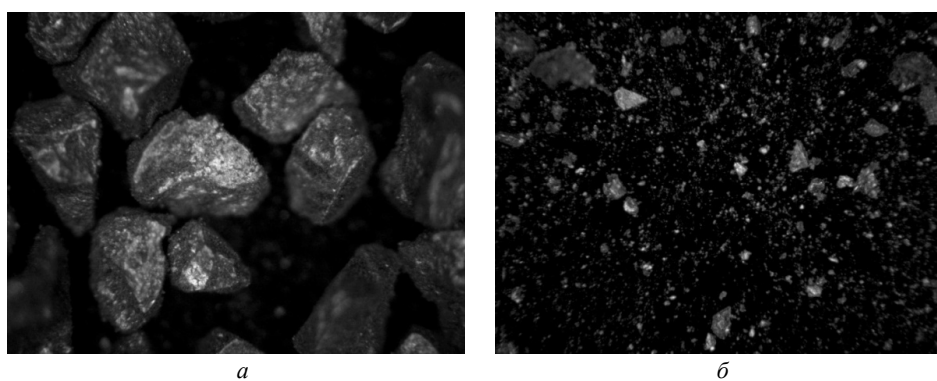


Рис. 4. Фракция № 1 (*a*); фракция № 3 (*б*). Время гранулирования 6 мин. Увеличение $\times 50$

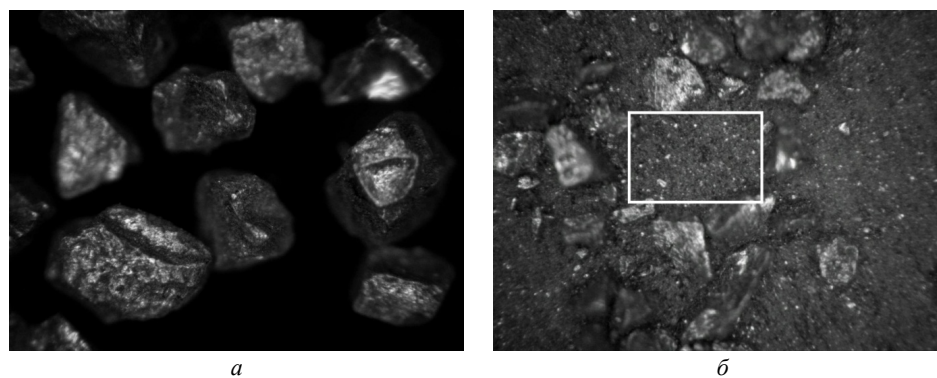


Рис. 5. Фракция № 1 (*a*); фракция № 3 (*б*). Время гранулирования 12 мин. Увеличение $\times 50$

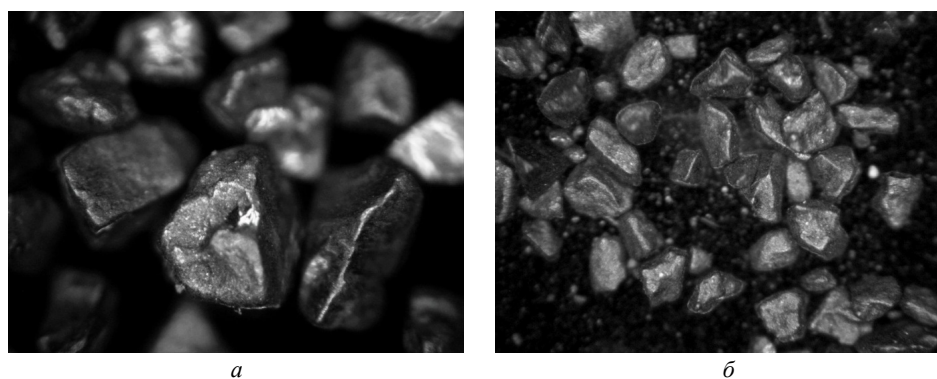


Рис. 6. Фракция № 1 (*a*); фракция 3 (*б*). Время гранулирования 21 мин. Увеличение $\times 50$

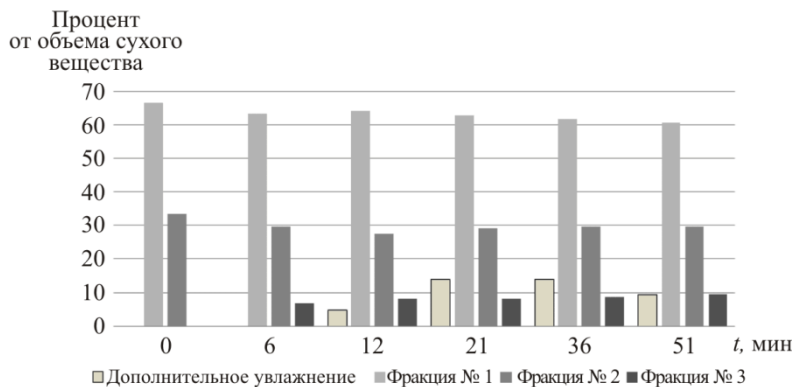


Рис. 7. Серия экспериментов № 1. Зависимость фракционного состава каменного угля от времени гранулирования

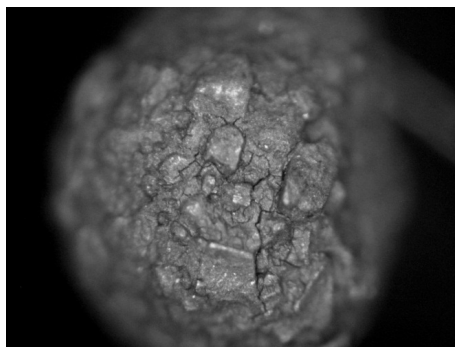
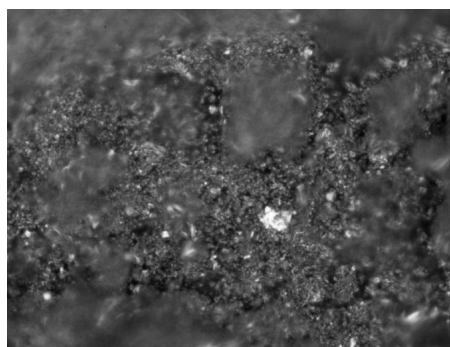


Рис. 8. Гранула диаметром 2 мм. Время гранулирования 36 мин. Увеличение $\times 50$

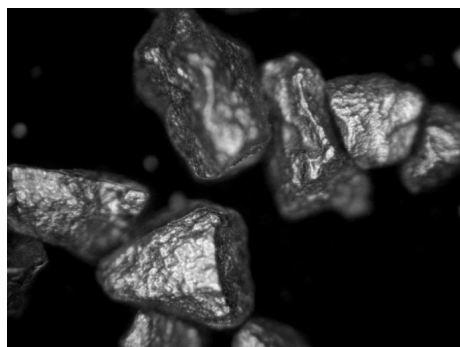


a

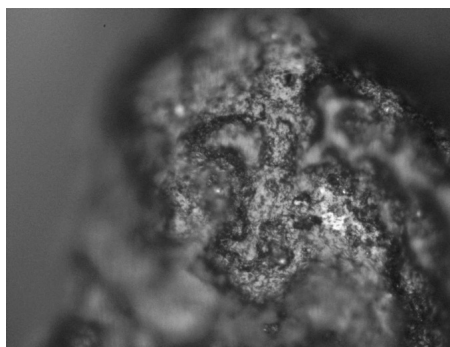


б

Рис. 9. Поверхность пластины, образованной на торцевой поверхности барабана в 1-й серии экспериментов: *a* – увеличение $\times 50$; *б* – увеличение $\times 400$. Время гранулирования 51 мин



a



б

Рис. 10. Фракция № 1: *a* – увеличение $\times 50$; *б* – увеличение $\times 400$. Время гранулирования 51 мин

Для гранулирования окатыванием в планетарном грануляторе с образованием гранул из измельченного до мелких фракций угля необходимо использовать фракции с размером частиц менее 1,25 мкм (см. рис. 12, б), требуется добавление воды в качестве связующего.

В работе показано, что возможны два способа получения гранул из твердых частиц каменного угля. В первом способе в качестве исходного материала используются частицы угля, полученные измельчением до требуемого размера гранул. Эти частицы шлифуются в планетарном грануляторе без добавления жидкости. Полученные гранулы имеют форму осколков, но со скругленными ребрами и вершинами, а также гладкими уплотненными гранями, прочность гранул равна прочности исходного материала, поверхность не подвержена разрушению от трения, пылению, так как уплотнена. Во втором способе используются частицы фракции менее 1,25 мкм, добавляется вода в качестве связующего, происходит процесс окатывания с образованием гранул.

В обеих сериях обнаружено, что на поверхности торцевых стенок барабана в периферической их части наблюдается образование агломератов частиц (рис. 14). Таким образом, торцевые поверхности являются местом наиболее эффективного образования агломератов. Для выявления различий в скорости сдвига и особенностях движения сыпучего материала около торцевых поверхностей барабана и в средней его части необходимо провести дополнительно компьютерное моделирование методом дискретных элементов [16–26].

Выдвигается гипотеза о том, что увлажненную пылевидную фракцию угля с размером частиц менее 1,25 мкм можно считать комплексным связующим. Доля этой фракции при гранулировании должна составлять не менее объема пористости крупной фракции, т.е. 25–30 %, и не более 40–45 %, так как масса, состоящая из увлажненной пыли, имеет минимальную текучесть. Планируется дополнительное проведение исследований по гранулированию с использованием вышеуказанного соотношения.

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Классен П.В., Гришаев И.Г. Основы техники гранулирования. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
2. Паронян В.Х., Гринь В.Т. Технология синтетических моющих веществ. – М.: Химия, 1984.
3. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. – М.: Металлургия, 1978.

4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.

5. Исследование процесса получения сферических гранул носителей катализаторов методом окатывания в планетарном грануляторе / Б.Л. Храмов, А.М. Ханов, Д.В. Лобовиков, С.М. Галилеев // Химическая промышленность. – 2000. – № 12. – С. 5–9.

6. Лобовиков Д.В., Ханов А.М., Храмов Б.Л. Моделирование динамики окатывания частиц сыпучего материала в барабане планетарного гранулятора // Математическое моделирование в естественных науках: тез. докл. 10-й Всерос. конф. молодых ученых / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2001. – С. 66.

7. Лобовиков Д.В., Ханов А.М., Храмов Б.Л. Математическая модель окатывания частиц в барабане, движущемся по планетарной траектории // Химия, технология и промышленная экология неорганических соединений: сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – Вып. 5. – С. 143–153.

8. Лобовиков Д.В., Ханов А.М., Храмов Б.Л. Кинетика гранулирования композиции в планетарном грануляторе // Химия, технология и промышленная экология неорганических соединений: сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. ун-т. – Вып. 5. – Пермь, 2002. – С. 134–142.

9. Лобовиков Д.В., Ханов А.М., Храмов Б.Л. Условие адгезии упругопластических сферических тел // Вестник Пермского государственного технического университета. Аэрокосмическая техника. – 2002. – № 13. – С. 67–71.

10. Планетарный гранулятор: пат. Рос. Федерация МКИ 7 В 01 J 2/12 / Лобовиков Д.В., Ханов А.М., Храмов Б.Л. – № 2191064, опубл. 20.10.2002, Бюл. № 29.

11. Планетарный гранулятор: пат. Рос. Федерация, МКИ 7 В 01 J 2/12 / Лобовиков Д.В., Ханов А.М., Храмов Б.Л. – № 2209661, опубл. 10.08.2003, Бюл. № 22.

12. Лобовиков Д.В. Влияние изменения параметров на процесс окатывания // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 2002. – С. 263–272.

13. Lobovikov D., Hanov A., Hramov B. Peculiarity of sliding of granular material on the surface of a rotating drum // Proceedings of XXX Summer School Advanced Problems in Mechanics 2002. – SPb., 2003. – P. 441–446.

14. Lobovikov D. Dry granulation of powder in a drum // XXXI International Summer School. Conference "Advanced Problems in Mechanics": book of abstracts. – SPb., 2003. – P. 65–66.

15. Lobovikov D. Experimental data of a granulation in a planetary granulator // XXXII International Summer School. Conference "Advanced Problems in Mechanics": book of abstracts. – SPb., 2004. – P. 68–69.

16. Давление в сыпучем материале при гранулировании в планетарном грануляторе. / А.М. Ханов, Д.В. Лобовиков, Л.Д. Сиротенко, Е.В. Матыгуллина // Вестник Пермского государственного технического университета. Проблемы современных материалов и технологий. – 2005. – № 11. – С. 163–169.

17. Лобовиков Д.В. Образование гранул в планетарном грануляторе // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – Вып. 4. – С. 55–60.

18. Лобовиков Д.В., Матыгуллина Е.В. Получение композиционных гранулированных материалов в планетарном грануляторе. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 153 с.

19. Pöschel T., Buchholtz V. Complex flow of granular material in a rotating cylinder // *Chaos, Solitons and Fractals*. – 1901 (1995). – Vol. 4.

20. Buchholtz V., Freund J.A., Poschel T. Molecular dynamics of comminution in ball mills // *Eur. Phys. J.* – 2000. – B. 16. – P. 169–182.

21. Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres / R. Ramirez, Th. Poschel, N.V. Brilliantov, Th. Schwager // *Physical Review E*. – 1999. – Vol. 60, no. 4. – P. 4465–4472.

22. Schwager T., Poschel T. Contact of viscoelastic spheres // *Friction, Arching, Contact Dynamics World Scientific*. – Singapore, 1997. – P. 293–299.

23. V. Buchholtz, Poschel T. A Vectorized algorithm formolecular dynamics of short range interacting particles // *International Journal of Modern Physics*. – 1993. – Vol. 4. – P. 1049.

24. Poschel T., Schwager T. *Computational granular dynamics*. – Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2005.

25. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29. – P. 47.

26. Ицкович Г.М. Сопротивление материалов. – М.: Высш. школа, 1998. – 368 с.

References

1. Klassen P.V., Grishaev I.G. *Osnovy tekhniki granulirovaniia* [Fundamentals of pelletizing techniques]. Moscow: Khimiia, 1982, 272 p.

2. Paronian V.Kh., Grin' V.T. *Tekhnologiia sinteticheskikh moiushchikh veshchestv* [Technology of synthetic detergents]. Moscow: Khimiia, 1984.

3. Zimon A.D., Andrianov E.I. *Autogeziia sypuchikh materialov* [Autogeography of bulk materials]. Moscow: Metallurgiiia, 1978.

4. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiia, 1973.

5. Khramov B.L., Khanov A.M., Lobovikov D.V., Galileev S.M. *Issledovanie protsessa polucheniia sfericheskikh granul nositelei katalizatorov metodom okatyvaniia v planetarnom granuliatore* [Study of the process of obtaining spherical granules of catalyst carriers by pelletizing in a planetary granulator]. *Khimicheskaiia promyshlennost'*, 2000, no. 12, pp. 5–9.

6. Lobovikov D.V., Khanov A.M., Khramov B.L. *Modelirovanie dinamiki okatyvaniia chastits sypuchego materiala v barabane planetarnogo granuliatora* [Simulation of the dynamics of pelletizing of bulk solids in a planetary pelletizer drum]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*. Perm': Izdatelstvo PGTU, 2001, p. 66.

7. Lobovikov D.V., Khanov A.M., Khramov B.L. *Ma-tematicheskaiia model' okatyvaniia chastits v barabane, dvizhushchemsia po planetarnoi traektorii* [Mathematical model of particle pelletizing in a drum moving along a planetary trajectory]. *Khimiia, tekhnologiia i*

promyshlennaiia ekologiia neorganicheskikh soedinenii, 2002, iss. 5, pp. 143–153.

8. Lobovikov D.V., Khanov A.M., Khramov B.L. *Kinetika granulirovaniia kompozitsii v planetarnom granuliatore* [Kinetics of Composition Granulation in a Planetary Granulator]. *Khimiia, tekhnologiia i promyshlennaiia ekologiia neorganicheskikh soedinenii*, 2002, iss. 5, pp. 134–142.

9. Lobovikov D.V., Khanov A.M., Khramov B.L. *Uslovie adgezii uprugoplasticheskikh sfericheskikh tel* [Adhesion condition for elastoplastic spherical bodies]. *Vestnik PGTU. Aerokosmicheskaiia tekhnika*, 2002, no. 13, pp. 67–71.

10. Lobovikov D.V., Khanov A.M., Khramov B.L. *Planetarnyi granuliator* [Planetary granulator]. Patent Rossiiskaiia Federatsiia MKI no. 2191064 (2002).

11. Lobovikov D.V., Khanov A.M., Khramov B.L. *Planetarnyi granuliator* [Planetary granulator]. Patent Rossiiskaiia Federatsiia no. 2209661 (2003).

12. Lobovikov D.V. *Vliianie izmeneniia parametrov na protsess okatyvaniia* [Influence of parameter changes on the pelletizing process]. *Vestnik PGTU. Mekhanika i tekhnologiia materialov i konstruksii*, 2002, pp. 263–272.

13. Lobovikov D. et al. *Peculiarity of sliding of granular material on the surface of a rotating drum*. *Proceedings of XXX Summer School Advanced Problems in Mechanics 2002*. Saint-Petersburg: Izdatelstvo Instituta problem mashinovedeniia RAN, 2003, pp. 441–446.

14. Lobovikov D. *Dry granulation of powder in a drum*. *XXXI International Summer School. Conference "Advanced Problems in Mechanics": book of abstracts*. Saint-Petersburg, 2003, pp. 65–66.

15. Lobovikov D. *Experimental data of a granulation in a planetary granulator*. *XXXII International Summer School. Conference "Advanced Problems in Mechanics": book of abstracts*. Saint-Petersburg, 2004, pp. 68–69.

16. Khanov A.M., Lobovikov D.V., Sirotenko L.D., Matyugullina E.V. *Davlenie v sypuchem materiale pri granulirovanii v planetarnom granuliatore* [Pressure in the bulk material during granulation in a planetary granulator]. *Vestnik PGTU. Problemy sovremennykh materialov i tekhnologii*, 2005, no. 11, pp. 163–169.

17. Lobovikov D.V. *Obrazovanie granul v planetarnom granuliatore* [Pellet formation in a planetary granulator]. *Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov*, 2006, iss. 4, pp. 55–60.

18. Lobovikov D.V. et al. *Poluchenie kompozitsionnykh granulirovannykh materialov v planetarnom granuliatore* [Obtaining composite granular materials in a planetary granulator]. Perm': Izdatelstvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, 153 p.

19. Pöschel T., Buchholtz V. Complex flow of granular material in a rotating cylinder. *Chaos, Solitons and Fractals*, 1995, no. 4, 1901 (1995).

20. Buchholtz V., Freund J.A., Poschel T. Molecular dynamics of comminution in ball mills. *Eur. Phys. Journal*, 2000, B 16, 169–182 (2000).

21. Rosa Ramirez, Thorsten Poschel, Nikolai V. Brilliantov, Thomas Schwager, *Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres*. *Physical review*, 1999, vol. 60, no. 4, pp. 4465–4472.

22. Thomas Schwager, Thorsten Poschel. Contact of viscoelastic spheres. Friction, *Arching, Contact Dynamics World Scientific*, 1997, p. 293-299.

23. Volkhard Buchholtz, Thorsten Poschel. A Vectorized algorithm formolecular dynamics of short range interacting particles. *International Journal of Modern Physics*, 1993, vol.4, 1049 (1993).

24. Thorsten Poschel, Thomas Schwager. Computational Granular Dynamics. *Springer Berlin Heidelberg*. New York. 2005.

25. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979, vol. 29, pp. 47.

26. Itskovich G.M. Soprotivlenie materialov [Material resistance]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1998, 368 p.

Получено 18.10.2021

Принято 10.11.2021

Опубликовано 30.12.2021

Сведения об авторах

Лобовиков Денис Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: ppk2004@inbox.ru.

Харченко Алексей Васильевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, специалист по

математическому моделированию ООО «Конструктив-СП», e-mail: hav@bk.ru.

Матыгуллина Елена Вячеславовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: matik68@rambler.ru.

Колчанов Николай Андреевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: nikolayiriv@yandex.ru.

About the authors

Denis V. Lobovikov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: ppk2004@inbox.ru.

Aleksey V. Kharchenko (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Mathematical Modeling Specialist, Konstruktiv-SP, e-mail: hav@bk.ru.

Elena V. Matygullina (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: matik68@rambler.ru.

Nikolay A. Kolchanov (Perm, Russian Federation) – Student of the Faculty of Mechanics and Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: nikolayiriv@yandex.ru.