



Научная статья

УДК 661.666.4

DOI: 10.52957/2782-1900-2025-6-2-50-56

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОКРОМ ГРАНУЛИРОВАНИИ В БЫСТРОХОДНОМ РОТОРНОМ ГРАНУЛЯТОРЕ

А.Е. Лебедев¹, А.А. Мурашов², И.С. Гуданов¹, А.А. Ватагин¹, Д.С. Долгин¹,
Ф.С. Орлов¹

Антон Евгеньевич Лебедев, д.т.н., профессор кафедры ТМО; Мурашов Анатолий Александрович, д.т.н., профессор кафедры «Математика»; Илья Сергеевич Гуданов, к.т.н., заведующий кафедрой ТМО; Александр Александрович Ватагин, к.т.н., доцент кафедры ТМО; Дмитрий Сергеевич Долгин, старший преподаватель; Федор Сергеевич Орлов, аспирант.

¹ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», 150023, Россия, г. Ярославль, Московский пр-кт, д. 88, lae4444@mail.ru, goudanov@yandex.ru, vatagerr@bk.ru, dim_dol.94@mail.ru, orlov.frgu@yandex.ru

²ЯВВУ ПВО им. Маршала Советского Союза Л.А. Говорова, 150001, Россия, г. Ярославль, Московский пр-кт, д. 28, alena.severyanka@mail.ru

Ключевые слова:

технический углерод,
гранулирование,
мокрый способ, гранула,
механизм формирования,
стадийность процесса

Аннотация.

В статье описан механизм образования гранул технического углерода в процессе гранулирования мокрым способом путем добавления в пылящий технический углерод специальной жидкой связующей добавки. Поставлена задача исследования и обоснована его актуальность. Приведено описание конструкции лабораторной грануляционной установки вертикального типа, состоящей из привода, штатива и корпуса. Основным элементом корпуса является вал с установленными на нем пальцами. Разработана методика для проведения эксперимента. Представлен график зависимости насыпной плотности и мощности от времени процесса, на основе которого определена стадийность процесса гранулирования: смачивание пылящего технического углерода, грануляционный переход, стадия интенсивных грануляционных изменений, стабилизация грануляционных изменений. Каждая из этих стадий в промышленных грануляторах распределена по длине аппарата и имеет различные мощностные характеристики.

Для цитирования:

Лебедев А.Е., Мурашов А.А., Гуданов И.С., Ватагин А.А., Долгин Д.С., Орлов Ф.С. Выявление механизма образования гранул порошкообразных материалов при мокром гранулировании в быстроходном роторном грануляторе // От химии к технологии шаг за шагом. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 50-56.
URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/6013/view>



Введение

Гранулирование является одним из наиболее эффективных способов компактирования порошкообразных материалов, который широко используется в транспортном, горном и строительном машиностроении [1, 2]. Этот процесс является одним из наиболее важных этапов в производстве технического углерода (ТУ), посредством которого получают его товарную форму – гранулы сферической формы диаметром 0.5-2.0 мм [3].

Технический углерод – это порошок темного цвета, образующийся в газовой фазе при термоокислительном или термическом пиролизе углеводородного сырья, сопровождающийся разложением углеводородов на углерод и водород под действием высокой температуры. Основным потребителем ТУ является шинная и резинотехническая промышленность, в которой технический углерод применяется в качестве активного наполнителя, особенно в резинах на основе синтетических каучуков [4-9].

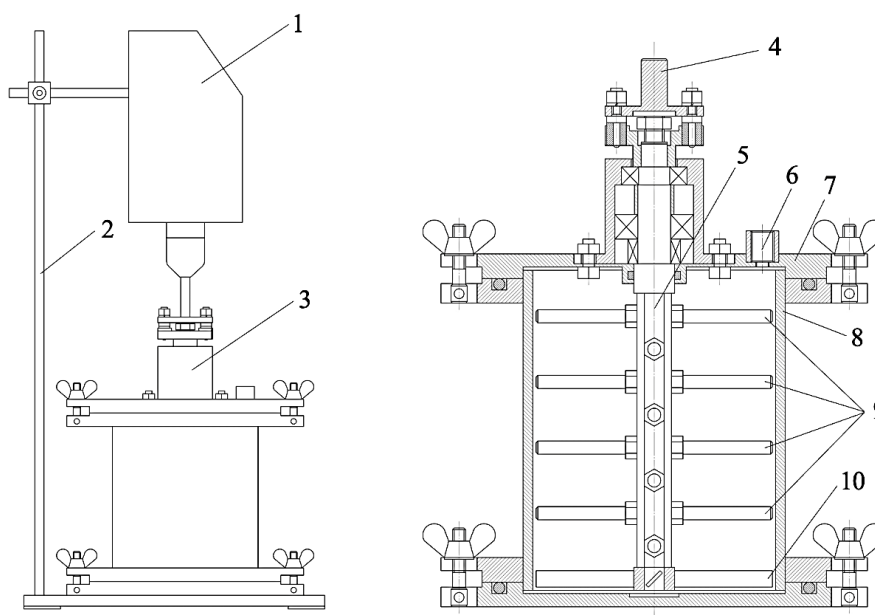
В настоящее время для получения гранул в промышленности применяются быстроходные грануляторы с вращающимся пальцевым валом, реализующие мокрый способ гранулирования [4, 10-15], при котором в пылящий ТУ вводится водный раствор связующего компонента.

Постановка задачи исследования

Однако, несмотря на широкое распространение данного способа гранулирования и оборудования для его реализации, проблема повышения качества товарного ТУ решена не окончательно. Это объясняется тем, что к настоящему времени отсутствует достоверная теория мокрого гранулирования, а также не выявлен механизм формирования гранул. Все это не позволяет повысить эффективность работы грануляторов, снизить расход воды и связующего компонента, увеличить однородность и стабильность качества получаемого гранулированного продукта по таким показателям, как: насыпная плотность, прочностные характеристики гранул и гранулометрический состав. Выявление механизма формирования гранул позволит решить приведенные выше проблемы и повысить качество готовой продукции.

Материалы и методы

С целью выявления механизма мокрого гранулирования ТУ и создания предпосылок для формирования теории мокрого гранулирования ТУ была разработана опытная установка, схема которой изображена на рис. 1.



1 - привод; 2 - штатив; 3 - лабораторный гранулятор; 4 - муфта втулочно-пальцевая; 5 - вал; 6 - патрубок для подачи связующего раствора; 7 - верхняя крышка; 8 - корпус; 9 - пальцы; 10 - лопастная мешалка

Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки

В рамках эксперимента были приняты следующие фиксированные параметры:

- марка ТУ – N660 в пылящем виде;
- соотношение раствора связующей добавки к пылящему ТУ – 120 мл/100 г;
- концентрация водного раствора связующей добавки – 0,2% мас.;
- частота вращения мешалки – 400 об/мин;
- зазор между корпусом и пальцами ротора – 2 мм.

Для исходного пылящего технического углерода марки N660 была определена насыпная плотность в соответствии с методикой [10], которая составила 146 кг/м³.

Порядок проведения эксперимента

В корпус гранулятора загружается 100 г пылящего ТУ, ротор гранулятора помещается внутрь корпуса и фиксируется зажимами на верхней крышке, заливается 120 мл раствора связующей добавки заданной концентрации, включается мешалка и засекается время от начала работы. По истечении заданного времени электродвигатель выключается, вынимается ротор, полученный продукт высыпается в металлический поддон и направляется на сушку в сушильный шкаф при температуре 120 °С и продолжительностью 24 ч, после сушки для полученного продукта определяется насыпная плотность в соответствии с методиками [4, 10-15].

Наработка образцов ТУ проводилась с интервалом в 5 с по продолжительности процесса гранулирования до момента стабилизации насыпной плотности продукта – далее с интервалом в 10 с. С целью статистической обработки данных для каждого временного отрезка было подготовлено по 3 образца. За результат определения насыпной плотности продукта, соответствующего определенной продолжительности



процесса, принималось среднее арифметическое из результатов определения показателей для 3 образцов.

Эксперимент проводился в вертикальном положении гранулятора. Данный подход к реализации эксперимента позволяет моделировать процесс в каждой отдельной зоне горизонтального аппарата, при этом время протекания процесса для вертикального положения условно соответствует пройденному пути по длине горизонтального гранулятора. Также реализация процесса в вертикальном положении позволяет избежать образования застойных зон в грануляторе при небольших размерах аппарата.

Результаты и их обсуждение

График, приведенный на рис. 2, наглядно демонстрирует стадийность процесса гранулирования. Для каждой стадии характерны индивидуальные зависимости насыпной плотности от продолжительности процесса, которые можно охарактеризовать как близкие к линейным.

На I стадии процесса (до 35 с включительно) наблюдается линейный рост насыпной плотности материала. Зависимость токовой нагрузки на мешалку в начале данной стадии также характеризуется линейным ростом с выходом на плато в конце. После остановки ротора в каждой точке I стадии наблюдается многофазная система – пылящий технический углерод с потенциальным наличием «зародышевых» гранул малого размера, межфазный слой, представляющий собой переувлажненный ТУ, и водный раствор связующей добавки, что указывает на незавершенность процесса смачивания.

На II стадии (с 35 до 40 с включительно) процесса наблюдается эффект «грануляционного перехода» - образующаяся внутри гранулятора система полностью переходит в однофазное (гранулоподобное) состояние с большим количеством крупных фрагментов (рис. 3). Данный эффект характеризует окончание процесса смачивания – водный раствор связующей добавки полностью переходит в связанное с ТУ состояние.

Зависимости токовой нагрузки на мешалку и насыпной плотности материала на данном участке указывают на резкий и кратковременный характер данного перехода. Одним из наиболее вероятных вариантов объяснения эффекта «грануляционного перехода» является достижение в массе материала критического содержания «зародышевых» гранул малого размера. Применение существующего метода анализа грануляционного состава не позволяет определить содержание подобных гранул – сита забиваются большим количеством пылящего ТУ. Для экспериментального подтверждения данного предположения необходима разработка специального метода анализа грануляционного состава с акцентом на определение содержания гранул малого размера при большом содержании пылящего ТУ.

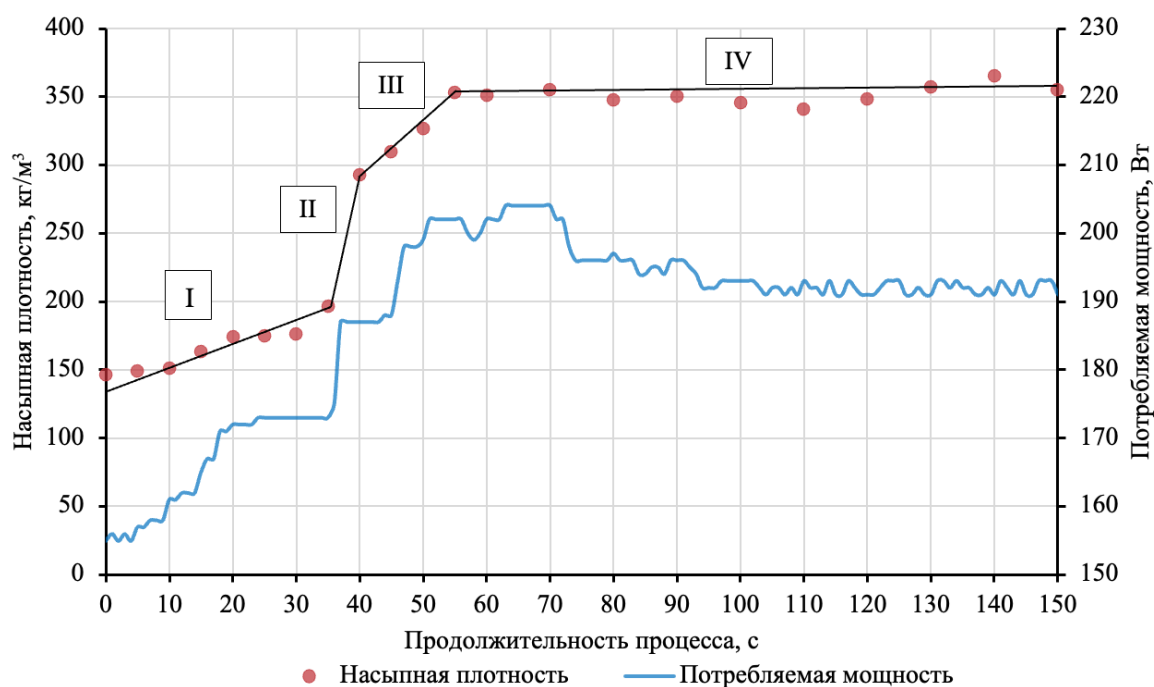


Рис. 2. Зависимость насыпной плотности образцов и токовой нагрузки на мешалке от продолжительности процесса

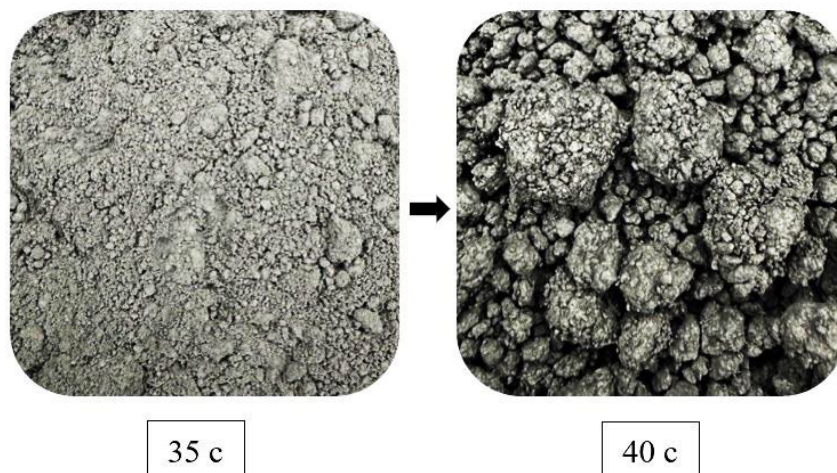


Рис. 3. Изменение структуры и формы гранулированной массы на II стадии процесса

Эффект «грануляционного перехода» также подтверждается резким ростом токовой нагрузки на мешалке, возникающим за счет резкого увеличения сопротивления материала в процессе перехода к гранулированной форме.

Также необходимо отметить, что при детальном рассмотрении полученной на 40 с грануляционной массы четко видна структура крупных фрагментов, которые представляют собой слипшиеся гранулы меньших размеров.

На III стадии (с 40 по 55 с включительно) процесса наблюдается снижение интенсивности увеличения насыпной плотности. При условии окончания процесса смачивания во II стадии изменение данной характеристики совместно с увеличением отблеска на поверхности гранул указывают на протекание процессов уплотнения и



шлифовки гранул, а также перераспределения гранулометрического состава посредством разрушения более крупных фрагментов и уменьшением среднего диаметра (рис. 4). Наблюдающийся рост токовой нагрузки на мешалке в данном временном интервале предположительно объясняется изменением характеристик гранул, подвергаемых разрушению, истиранию, шлифовке. По мере протекания процесса в системе остается все меньше неуплотненных хрупких гранул. При сохранении интенсивности грануляционного перераспределения внутри системы источниками для подобных изменений становятся все более прочные гранулы, для деформации которых требуется больше энергии.

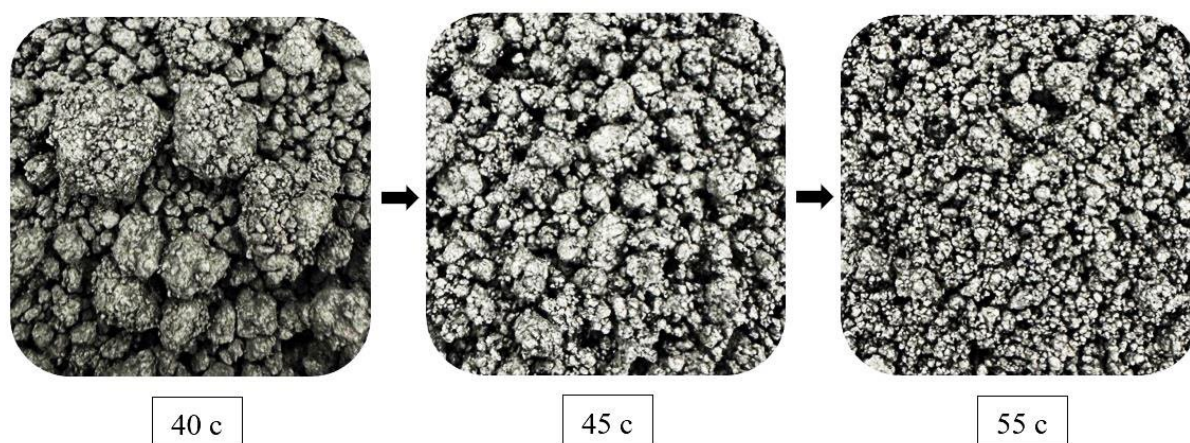


Рис. 4. Изменение структуры и формы гранулированной массы на III стадии процесса

Завершающая IV стадия не подлежит однозначной трактовке. С одной стороны, значение насыпной плотности, согласно аппроксимирующей линии, растет по мере протекания процесса, с другой – данный рост не превышает значение сходимости для стандартного метода определения данного показателя. Токовая нагрузка на мешалке снижается до стабилизации данного показателя с 95 с. Отсутствие существенных визуальных изменений материала (рис. 5), изменений насыпной плотности и токовой нагрузки на мешалку указывает на стабилизацию системы внутри гранулятора, интенсивность грануляционных изменений значительно снижается.

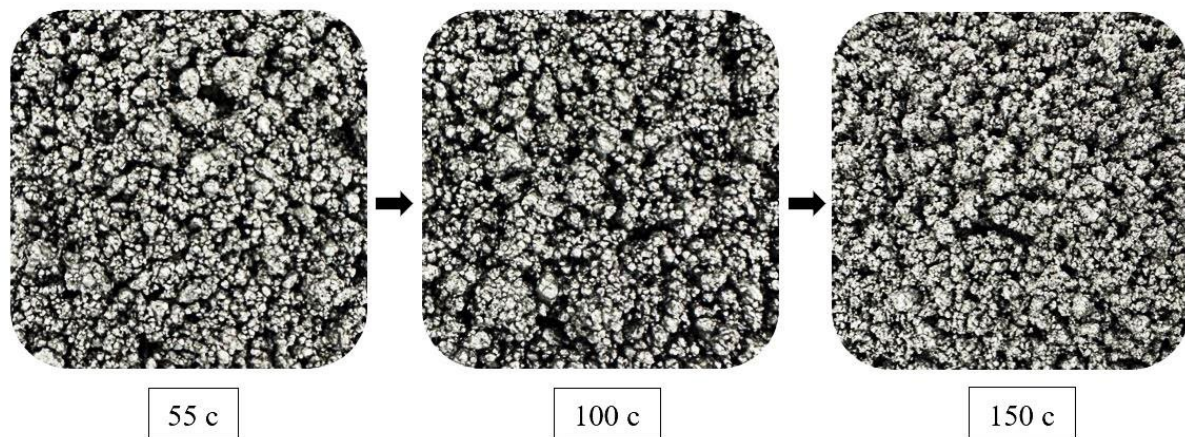


Рис. 5. Изменение структуры и формы гранулированной массы на IV стадии процесса



Выводы и рекомендации

Таким образом, в результате проведенных исследований было выявлено, что процесс формирования гранул происходит в четыре стадии:

1. Смачивание пылящего ТУ.
2. Грануляционный переход.
3. Стадия интенсивных грануляционных изменений.
4. Стабилизация грануляционных изменений.

Каждая из представленных стадий в промышленных грануляторах распределена по длине аппарата и имеет различные мощностные характеристики.

Список источников

1. Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А. Производство и использование технического углерода для резин. Ярославль: Изд-во Александр Рутман, 2002, 512 с.
2. Kugatov P.V., Ivashkina E.A., Zhirnov B.S. Granular Carbon Adsorbent Based on Carbon Black and Synthetic Pitch. *Solid Fuel Chem.*, 2023, 57, 423-427. DOI: 10.3103/S0361521923060034.
3. Макаренков Д.А., Назаров В.И., Мавлюдова Я.А. Особенности процесса гранулирования топливных композиций методом прокатки на роторных грануляторах. *Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки*, 2015, 1, 42-49.
4. Севостьянов В.С., Апатенко А.С., Шамгулов Р.Ю., Проценко А.М. Разработка технических средств для переработки и гранулирования технического углерода термолизной технологии. *СТИН*, 2022, 3, 37-40.
5. Игуменова Т.И., Шульга А.М. Проблемы использования пиролизного технического углерода в производстве шин: материалы LVIII отчетной науч. конф. преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ. Ч 1. Воронеж: Изд-во ВГУИТ, 2020, С. 104.
6. Журавский Г.И. Технический углерод из продуктов термолиза изношенных шин. *ИФЖ*, 2020, 93(6), 1523-1528.
7. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Омск: ОАО «Техуглерод», 2004, 228 с.
8. Васильев П.С., Павлова А.Е. Совершенствование аппаратного оформления стадии гранулирования технического углерода мокрым способом. *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт*, 2023, 1(42), 11-19.
9. Родионов Д.А., Суворина И.В., Князев Ю.В. Утилизация автомобильных шин. *Молодой ученый*, 2016, 4(108), 936-937. URL: <https://moluch.ru/archive/108/25962> (дата обращения: 09.03.2025).
10. Шамгулов Р.Ю., Гончаров А.Н. Разработка барабанно-винтового агрегата для гранулирования технического углерода: материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021, С. 1844-1847.
11. ASTM D1513-05(2023). Standard Test Method for Carbon Black, Pelleted – Pour Density. Annual Book of ASTM Standards, 2023, 09.01, 2 p.
12. Бортников В.Г. Теоретические основы и технология переработки пластических масс: учебник. М.: ИНФРА-М, 2015, 480 с.
13. Koltsova T.B., Tsobkhallo E.S., Meshcheryakova G.P. Modeling of Deformation Properties of Composite Material Filled with Technical Carbon. *Fibre Chem.*, 2024, 56, 226-229. DOI: 10.1007/S10692-024-10559-2.
14. Kolipaka S.S., Junqueira L.A., Ross S., Garg V., Hossein Mithu MdS.H, Bhatt S., Douroumis D. An Advanced Twin-Screw Granulation Technology: The use of Non-Volatile Solvents with High Solubilizing Capacity. *AAPS PharmSciTech*, 2024, 25, 174. DOI: 10.1208/s12249-024-02890-y.
15. Kugatov P.V., Ivashkina E.A., Zhirnov B.S. Granular Carbon Adsorbent Based on Carbon Black and Synthetic Pitch. *Solid Fuel Chem.*, 2023, 57, 423-427. DOI: 10.3103/S0361521923060034.

Поступила в редакцию 21.04.2025

Одобрена после рецензирования 05.05.2025

Принята к опубликованию 15.05.2025